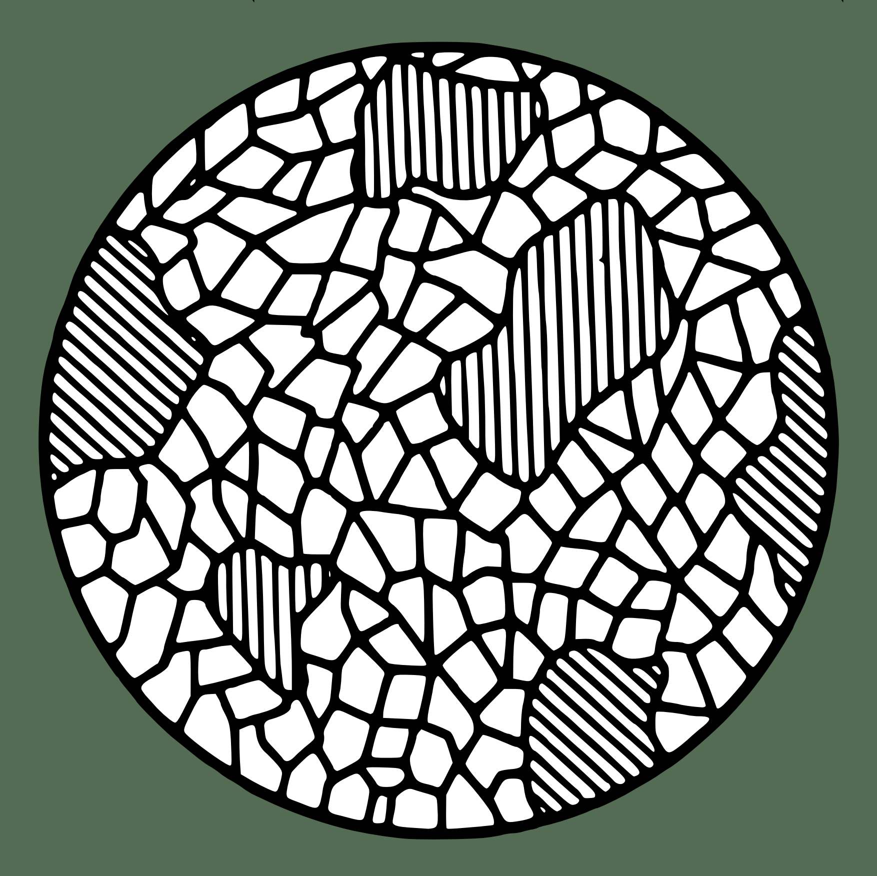
V. Vorobiev

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION



Éditions Mir Moscou

В. А. ВОРОБЬЕВ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ДЕТАЛИ

На французском языке

ИЗДАТЕЛЬСТВО « ВЫСШАЯ ШКОЛА »
МОСКВА

V. VOROBIEV

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

ÉDITIONS MIR • MOSCOU 1967

UDC 624.056+691 (075.3)=40

Traduit du russe par C.-R. Monney

L'auteur de ce livre, Vassili Vorobiev, est un spécialiste soviétique travaillant dans le domaine des matériaux de construction. Docteur ès sciences techniques, il dirige actuellement la chaire des matériaux de construction organiques et des matières plastiques à l'Ecole Supérieure des Travaux publics et du Bâtiment de Moscou.

Ce manuel comporte les renseignements essentiels sur les matériaux de construction les plus utilisés dans le Bâtiment (métaux, pierres naturelles et artificielles, liants, bétons, bois, matières plastiques, etc.).

Des chapitres spéciaux sont consacrés aux différents éléments structuraux des bâtiments, à l'emploi du béton préfabriqué dans la construction d'immeubles d'habitation, d'édifices publics et de bâtiments industriels.

Ce manuel est destiné aux élèves des écoles techniques du Bâtiment.

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

§ 1. MASSE SPÉCIFIQUE

On appelle **masse ou poids spécifique** d'un matériau la masse du matériau par unité de volume, sans tenir compte des pores. On désigne généralement cette densité par la lettre grecque γ (gamma).

L'état d'un matériau sans pores remplis d'air est souvent appelé état de compacité absolue. La masse spécifique est donc la masse de l'unité de volume du matériau à l'état de compacité absolue.

Pour calculer la masse spécifique d'un matériau, il faut diviser le poids de matière sèche G par le volume absolu V_a occupé par la matière (c'est-à-dire sans comprendre dans le volume les pores ou les vides) :

$$\gamma = \frac{G}{V_a}, \text{ en g/cm}^3. \qquad (1)$$

On considère parfois la masse spécifique comme étant une valeur abstraite par rapport à celle de l'eau (1,0).

La masse spécifique des matériaux de construction n'a qu'une importance secondaire. Elle sert principalement à calculer la compacité et la porosité des matériaux. Ces deux propriétés ont une grande importance pratique.

La masse spécifique des maçonneries varie entre 2,2 et 3,3 g/cm³. Celle des matières organiques (bois, bitume, goudron, poix, huile de lin, laques et vernis) varie entre 0,9 et 1,6 g/cm³ ; celle des métaux sidérurgiques (fonte et acier) varie entre 7,25 et 7,85 g/cm³. La masse spécifique de la plupart des matériaux de construction est supérieure à l'unité. Font exception à cette règle le bois, les laques, l'huile de lin, le béton mousse, certaines matières synthétiques, etc.

§ 2. MASSE VOLUMIQUE

On appelle **masse volumique**, désignée par la lettre γ_0, le poids de l'unité de volume d'un matériau à l'état naturel (c'est-à-dire en y comprenant les pores).

Pour déterminer la masse volumique, on calcule le volume V_1 du matériau d'après les dimensions extérieures de l'échantillon, ou bien d'après le volume d'eau déplacé par cet échantillon. La masse volumique s'exprime par la formule suivante :

$$\gamma_0 = \frac{G}{V_1}, \text{ en g/cm}^3 \text{ ou en kg/m}^3. \quad (2)$$

Quand on calcule la masse volumique des matériaux en vrac (sable, gravier) sans défalquer les vides compris entre les grains, cette masse est appelée masse volumique de remblayage.

La masse volumique de la plupart des matériaux est inférieure à leur masse spécifique. Par exemple, la masse volumique d'une brique en argile est en moyenne de 1,7 g/cm³, alors que sa masse spécifique est d'environ 2,5 g/cm³.

La masse spécifique et la masse volumique ne sont égales que pour les matières à compacité absolue (verre, acier, bitume, matières liquides).

La masse volumique des matériaux de construction a une importance pratique extrêmement grande. Il faut en effet connaître cette masse pour calculer la résistance ou stabilité des constructions en tenant compte de leur

Tableau 1

Masse volumique de quelques matériaux de construction à l'état sec à l'air libre

Matériaux	γ_0 en kg/m³	Matériaux	γ_0 en kg/m³
Granit	2500-2700	Sable	1450-1650
Pierre calcaire . .	1800-2400	Acier	7850
Brique d'argile	1600-1900	Pin	400-600
Gravier	1400-1700	Chêne	700-900
Béton ordinaire	1800-2400	Laine minérale . .	200-300
Béton de scorie	1200-1800	Mipor	20

poids propre. La masse volumique est également indispensable aux calculs concernant les transports de matériaux.

A la différence de la masse spécifique, la masse volumique des divers matériaux de construction varie dans une gamme étendue depuis 20 kg/m³ pour certains matériaux calorifuges extrêmement légers jusqu'à 7 850 kg/m³ pour les aciers.

Plus un matériau est humide, plus sa masse volumique est élevée.

Le tableau 1 donne les masses volumiques de quelques matériaux de construction courants.

§ 3. COMPACITÉ

On appelle **compacité** d'un matériau la proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue.

Considérons un matériau qui, à l'état naturel, c'est-à-dire avec les pores, occupe un volume V_1, alors qu'à l'état de compacité absolue il occupe un volume V_a moindre. Le rapport V_a/V_1 est la compacité du matériau, désignée par la lettre grecque Π.

Les formules (1) et (2) permettent d'exprimer la compacité d'un matériau de la manière suivante :

$$\Pi = V_a/V_1 = \frac{G}{\gamma} : \frac{G}{\gamma_0} = \gamma_0/\gamma. \qquad (3)$$

On voit donc que la compacité est égale au rapport des masses volumique et spécifique.

On peut également exprimer la compacité en pour cent :

$$\Pi = 100 \cdot \gamma_0/\gamma, \text{ en } \%. \qquad (4)$$

La compacité Π de presque tous les matériaux de construction est inférieure à 100% du fait que le matériau contient une quantité plus ou moins grande de pores.

§ 4. POROSITÉ

La **porosité** est le rapport du volume des pores au volume total du matériau.

La porosité Π_0 est le complément de la compacité à l'unité ou à 100% :

$$\Pi_0 = 1 - \frac{\gamma_0}{\gamma} \qquad (5)$$

ou

$$\Pi_0 = 100 \cdot \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma}, \text{ en } \%. \quad (6)$$

D'après la grosseur des pores remplis d'air, on distingue les matériaux finement poreux (pores ayant quelques centièmes ou millièmes de mm de grosseur) et les matériaux à gros pores (pores variant de quelques dixièmes de mm jusqu'à un ou deux mm).

La compacité et la porosité des matériaux jouent un rôle important dans les travaux de construction, car ces deux caractéristiques influent sur d'autres propriétés telles que la résistance mécanique, l'absorption d'eau, la perméabilité à l'eau, la conduction, la résistance au gel, l'insonorité, la résistance aux acides, etc. Les constructions qui doivent être imperméables à l'eau exigent la mise en œuvre de matériaux extrêmement compacts. Les constructions faiblement conductrices de la chaleur doivent être réalisées en matériaux finement poreux et mauvais conducteurs de chaleur, etc.

La porosité des matériaux de construction varie dans une gamme étendue depuis zéro (acier et verre) jusqu'à 90% (plaques de laine minérale).

§ 5. ABSORPTION D'EAU

L'a b s o r p t i o n d'e a u est le pouvoir que possède un matériau pour absorber et retenir l'eau.

On détermine l'absorption d'eau par la différence existant entre les poids d'un échantillon du matériau saturé d'eau et à l'état absolument sec. On l'exprime en pour cent du poids de matière sèche, ou encore, ce qui est plus clair, en pour cent du volume de l'échantillon. On désigne l'absorption pondérale d'eau par B_p, et l'absorption volumique d'eau par B_v.

Un matériau est généralement saturé d'eau avant que les pores difficilement accessibles soient complètement remplis d'eau (surtout si l'opération se fait sans chauffage, sans intervention du vide, etc.). En outre, un matériau contient généralement une certaine quantité de pores fermés. Pour ces deux raisons, l'absorption volumique d'eau par un matériau est généralement inférieure à la porosité.

Le procédé employé pour saturer d'eau les divers matériaux en vue de déterminer leur absorption d'eau est défini dans les normes soviétiques correspondantes.

Si l'on désigne par G_1 le poids du matériau à l'état sec et par G_2 le poids du matériau à l'état saturé, la quantité d'eau absorbée est $G_2 - G_1$. Si V_1 désigne le volume du matériau à l'état naturel, on peut exprimer comme suit les formules permettant de calculer l'absorption pondérale et l'absorption volumique :

$$B_p = 100 \cdot \frac{G_2 - G_1}{G_1}, \text{ en } \%, \tag{7}$$

$$B_v = 100 \cdot \frac{G_2 - G_1}{V_1}, \text{ en } \%. \tag{8}$$

Le rapport entre l'absorption volumique et l'absorption pondérale a pour valeur :

$$\frac{B_v}{B_p} = \frac{G_2 - G_1}{V_1} : \frac{G_2 - G_1}{G_1} = \frac{G_1}{V_1} = \gamma_0. \tag{9}$$

Ce rapport est donc égal numériquement à la masse volumique du matériau.

On en déduit la formule suivante qui permet de passer de l'un à l'autre des deux pouvoirs absorbants :

$$B_v = B_p \cdot \gamma_0. \tag{10}$$

L'absorption volumique d'eau, qui est numériquement égale au volume des pores accessibles à l'eau, est appelée *porosité apparente*, pour la distinguer de la *porosité réelle*.

L'absorption volumique d'eau est toujours inférieure à 100%, tandis que l'absorption pondérale peut être parfois supérieure à 100% dans les matériaux très poreux, par exemple, dans les plaques calorifuges en tourbe.

L'absorption d'eau des divers matériaux de construction varie dans une très large gamme. L'absorption pondérale d'une brique d'argile ordinaire varie de 8 à 20% ; celle des carreaux céramiques ne dépasse pas 2% ; celle du béton lourd est d'environ 3% ; celle du granit varie de 0,5 à 0,7%, et celle de certains matériaux hydrofuges est de 0,1%.

Pour saturer d'eau un échantillon d'un matériau, on l'immerge progressivement dans l'eau, ou bien on le maintient plongé dans de l'eau bouillante.

Les propriétés des matériaux sont radicalement modifiées quand ces matériaux sont saturés d'eau : la conduction, la masse volumique, ainsi que le volume (dans certains matériaux tels que le bois, etc.) augmentent, tandis que la résistance mécanique diminue (par suite de l'affaiblissement des liaisons entre les particules).

Etant donné l'influence considérable de la saturation d'eau sur les matériaux, il est bon de procéder aux essais de leur résistance non seulement à l'état sec, mais encore à l'état saturé.

On appelle *coefficient de ramollissement* le rapport entre les résistances mécaniques d'un matériau saturé d'eau et à l'état sec. Ce coefficient est un facteur important, car il caractérise la résistance opposée à l'action de l'eau par un matériau qui peut s'y trouver exposé en cours de service.

Le coefficient de ramollissement varie de zéro (matériaux argileux non cuits) à 1,0 (matériaux dont la résistance mécanique n'est pas modifiée par l'action de l'eau, tels que le verre, l'acier, le bitume).

On ne doit pas employer les matériaux de maçonnerie (naturels et artificiels) en des endroits humides si leur coefficient de ramollissement est inférieur à 0,75. Les matériaux dont le coefficient de ramollissement est supérieur à 0,75 sont considérés comme r é s i s t a n t à l'e a u.

§ 6. LIBÉRATION D'EAU

Le d é g a g e m e n t (ou la l i b é r a t i o n) d e l'e a u est la propriété que possède un matériau de dégager de l'eau en présence de certaines conditions dans le milieu ambiant (diminution de l'humidité, chauffage, mouvement de l'air).

On exprime la libération de l'eau par la vitesse de dessiccation du matériau, c'est-à-dire par la quantité d'eau perdue en 24 heures (exprimée en pourcentage du poids ou du volume d'un échantillon normalisé), lorsque l'air environnant a une humidité relative de 60%, et une température de 20 °C.

L'h u m i d i t é des matériaux, c'est-à-dire la proportion pondérale d'eau dans les matériaux employés dans les constructions, est très inférieure à leur pouvoir total d'absorption d'eau. Par suite du dégagement de l'humidité, après une certaine période suivant l'achèvement de la cons-

truction (un semestre ou une année), l'équilibre s'établit entre l'humidité des éléments structuraux et l'humidité de l'air. Cet état d'équilibre est appelé *état sec à l'air libre*.

En laboratoire on peut sécher dans une étuve un matériau jusqu'à élimination complète de l'eau en opérant à 110 °C. Cet état du matériau est appelé *état absolument sec*. Les matériaux constituant les éléments d'un bâtiment ne sont jamais absolument secs. Ils contiennent toujours une certaine proportion d'eau que l'on exprime par son rapport au poids de la matière sèche.

§ 7. PERMÉABILITÉ

La *perméabilité* est la propriété que possède un matériau pour laisser passer l'eau sous pression. La valeur de la perméabilité dépend de la compacité et de la structure du matériau. Les matériaux particulièrement compacts, par exemple le verre, le bitume, l'acier, sont imperméables à l'eau. Les matériaux aux pores fins fermés sont de même pratiquement imperméables.

La perméabilité est exprimée par la quantité d'eau traversant en une heure une surface de 1 cm^2 du matériau sollicité par une pression constante.

Certains matériaux (par exemple, les tuyaux d'eau et d'assainissement) doivent toujours être suffisamment imperméables à l'eau. Une forte imperméabilité est particulièrement importante pour les étanchéités.

Les essais de perméabilité des divers matériaux se font sur des appareils spéciaux (fig. 1). L'échantillon *1* de forme conique est représenté schématiquement sur la figure, sans respecter l'échelle (son épaisseur ne dépasse pas 2 à 3 cm, par exemple, pour certaines solutions). On place cet échantillon dans un moule *2* conique métallique. Les faces latérales de l'échantillon sont enduites de paraffine. L'eau sous pression (manomètre *4*) envoyée par la pompe *3* arrive sous l'échantillon, l'appuie contre le moule pour être ensuite refoulée à travers les pores qui communiquent entre eux et avec le milieu extérieur.

Après avoir traversé l'échantillon, l'eau s'écoule dans un verre par un tube. L'essai une fois terminé, cette eau est pesée.

L'imperméabilité à l'eau est le facteur le plus important caractérisant les matériaux bitumineux d'étanchéité. Les échantillons de ces matériaux (rubéroïde, par exemple) sont soumis à l'action d'une faible hauteur d'eau (50 mm), et l'on mesure le temps au bout duquel on voit apparaître

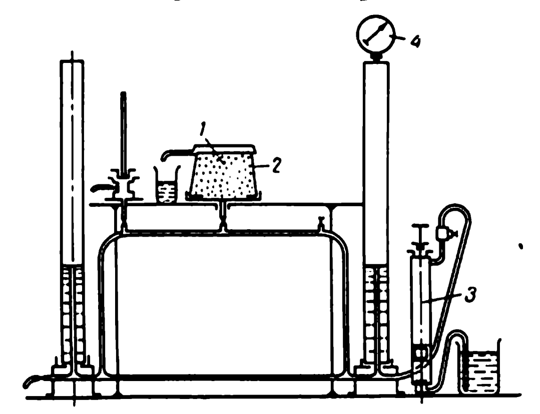


Fig. 1. Appareil de mesure de la perméabilité

les premiers suintements. Dans les essais de tuiles en argile, on se borne également à des déterminations qualitatives de l'imperméabilité à l'eau.

§ 8. RÉSISTANCE AU GEL

Pour les pays où pendant l'hiver la température tombe au-dessous de zéro, la résistance des matériaux de construction au gel a une grande importance. On appelle *résistance au gel* la propriété que possède un matériau saturé d'eau de supporter des cycles de gel et de dégel, sans aucun indice de détérioration et sans réduction importante de la résistance mécanique.

Certains matériaux de construction, qui sont en contact avec l'air extérieur (matériaux des toitures et des murs, par exemple), se détériorent progressivement. Cette détérioration tient à ce que le matériau se sature d'eau complètement ou incomplètement, et que, au-dessous de 0 °C, cette eau se congèle dans les pores, et se dilate d'environ 10% en volume.

La glace qui se forme dans les pores de la matière comprime les parois des pores et peut les briser, réduisant ainsi

la résistance de la matière. Le déplacement ou migration de l'eau à travers les pores y contribue également.

Les matériaux compacts, c'est-à-dire ceux qui ne contiennent pas de pores ou n'ont qu'une porosité peu ouverte, absorbent extrêmement peu d'eau et par suite résistent bien au gel. Les matériaux poreux ne résistent bien au gel que lorsque l'eau occupe au plus 90% du volume des pores accessibles. Pratiquement, on ne peut s'attendre à une résistance satisfaisante au gel que dans les matériaux poreux où l'eau n'occupe que 80 à 85% du volume des pores accessibles.

Pour qu'un matériau résiste au gel, le coefficient de ramollissement ne doit pas être inférieur à 0,75, du fait que les impuretés saturées d'eau nuisent à cette résistance.

Les essais de résistance des matériaux au gel se font dans des glacières. Un essai consiste à faire geler l'échantillon à de nombreuses reprises (de 10 à 200 fois selon les conditions de service prévues) et à le faire dégeler dans l'eau à la température ordinaire, après chaque gel. La température de gel doit être inférieure à —17 °C, parce que l'eau qui se trouve dans les pores extrêmement fins (capillaires) de certains matériaux de construction ne gèle qu'à cette température.

Un matériau *résiste bien au gel* si, après le nombre prévu de cycles de gel et de dégel, l'échantillon ne présente ni effritements, ni fissurations, ni exfoliations, et si son poids n'a pas diminué de plus de 5%. La résistance des échantillons ayant subi les essais ne doit pas tomber au-dessous de 25% de celle des échantillons de référence non soumis aux essais.

D'après le nombre des cycles de gel et de dégel prévus aux essais, on distingue les types suivants de matériaux : 10-15-25-35-50-100-150 et 200.

Si l'on doit accélérer l'essai de résistance d'un matériau au gel, on remplace le gel par une immersion de l'échantillon dans une solution saturée de sulfate de sodium hydraté ($Na_2SO_4 \cdot 10\ H_2O$), et l'on sèche l'échantillon après une saturation totale à 105 °C. Les cristaux de sulfate de sodium qui se forment dans les pores au cours de séchage compriment le verre plus fortement que l'eau congelée. Aussi, si le matériau ne résiste pas à cet essai, particulièrement sévère, il faudra absolument avoir recours à l'essai décrit plus haut.

§ 9. CONDUCTION

La conduction est la propriété que possède un matériau de transmettre à travers son épaisseur un flux thermique résultant d'une différence entre les températures qui règnent sur les faces de ce matériau.

La conduction est un facteur très important pour les matériaux employés comme enceintes des bâtiments ou constructions (c'est-à-dire comme murs extérieurs, planchers hauts, planchers inférieurs). Elle est plus particulièrement importante pour les matériaux calorifuges, qui ont pour but de conserver la chaleur à l'intérieur des locaux et des installations de chauffage.

La conduction des divers matériaux de construction est exprimée par le coefficient de conduction désigné par la lettre λ.

Considérons un mur plan et homogène, d'épaisseur a m et de surface F m^2, dont les faces sont parallèles. Si les températures des surfaces des murs sont différentes, mais constantes t_1 et t_2 (t_1 étant supérieure à t_2), le mur sera traversé par un flux constant de chaleur. La quantité de chaleur Q traversant le mur pendant z heures est directement proportionnelle à la différence des températures, à la surface du mur et au temps nécessaire au passage du flux de chaleur ; elle est inversement proportionnelle à l'épaisseur du mur :

$$Q = \lambda \frac{F (t_1 - t_2) z}{a}, \text{ en kcal.} \qquad (11)$$

Cette formule permet de déterminer facilement le coefficient de conduction :

$$\lambda = \frac{Q \cdot a}{F (t_1 - t_2) z}, \text{ en kcal/m} \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}. \qquad (12)$$

Si l'on admet $a = 1$ m, $F = 1$ m^2, $t_1 - t_2 = 1$ °C, et $z = 1$ h et si l'on introduit ces valeurs dans la formule précédente, on obtient (numériquement) :

$$\lambda = Q, \text{ en kcal.} \qquad (13)$$

Autrement dit, le coefficient de conduction est égal à la quantité de chaleur (en kcal) qui traverse un mur d'une épaisseur de 1 m et d'une superficie de 1 m^2 en une heure, lorsque la différence entre les températures des deux faces opposées est de 1 °C.

La conduction d'un matériau dépend de sa porosité, du caractère des pores, de la nature de la matière, de l'humidité, de la masse volumique et de la température moyenne de transmission de la chaleur.

Dans les matériaux poreux, le flux thermique est transmis à travers la matière solide et à travers les vides qui sont remplis d'air. La conduction de l'air est très faible (0,02). L'air oppose donc une résistance élevée au passage du flux thermique. Le coefficient de conduction des matières poreuses sèches est compris entre ceux de la matière proprement dite et de l'air. Le coefficient est d'autant plus faible que la porosité est plus élevée, c'est-à-dire que la masse volumique du matériau est plus faible. Inversement, le coefficient de conduction est d'autant plus grand que la masse volumique du matériau est plus grande.

Il n'existe aucune relation générale entre la masse volumique et la conduction valable pour tous les matériaux de construction.

On peut calculer approximativement le coefficient de conduction des matériaux à l'état sec à l'air libre (ce qui correspond à une humidité naturelle volumique de 1% à 7%, qui est celle des murs des bâtiments) d'après la masse volumique à l'aide de la formule empirique proposée par V. Nékrassov :

$$\lambda = \sqrt{0{,}0196 + 0{,}22\gamma_0^2} - 0{,}14, \text{ en kcal/m} \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}. \quad (14)$$

L'humidité du matériau a une très grande influence sur la conduction du fait que, dans l'eau, on a $\lambda = 0{,}50$, valeur 25 fois plus élevée que dans l'air. Pour cette raison, les pores remplis d'eau laissent passer le flux thermique beaucoup plus facilement que les pores remplis d'air.

La température à laquelle s'effectue la transmission de chaleur a une certaine influence sur le coefficient de conduction. Ce coefficient diminue quand la température augmente dans les métaux, alors qu'il augmente dans les mêmes conditions dans la plupart des autres matières.

L'augmentation du coefficient de conduction avec la température a une grande importance lorsqu'il s'agit des matériaux utilisés pour calorifuger les tuyaux de vapeur, les chaufferies, etc.

La structure de la matière a également une influence sur le coefficient de conduction : si la structure est stratifiée ou bien fibreuse avec un sens bien déterminé des

fibres, le coefficient de conduction dépend de la direction du flux de vapeur par rapport au sens des fibres. Dans le bois par exemple, où les fibres ont le sens du tronc, le coefficient de conduction, lorsque le flux est dirigé dans le sens des fibres, est deux fois plus grand que lorsqu'il est dirigé dans la direction perpendiculaire aux fibres (respectivement 0,30 et 0,15). C'est pourquoi, par exemple, la conduction d'un plancher en pavés de bois est supérieure à celle d'un plancher ordinaire.

La grosseur des pores de la matière a également une influence sur son coefficient de conduction. Les matériaux à fines porosités sont moins conducteurs que les matériaux à grosses porosités. Les matériaux à pores fermés sont également moins conducteurs que les matériaux dont les pores communiquent. Ces deux différences s'expliquent par le fait que les grosses porosités et les porosités communicantes sont parcourues par un certain courant d'air qui est accompagné par un transport de chaleur (convexion), ce qui accroît le coefficient global de conduction.

Le tableau 2 indique les coefficients de conduction des matériaux calorifuges. De plus, pour permettre une comparaison, il indique également les coefficients de conductivité thermique de quelques autres matériaux de construction.

Tableau 2

Coefficients de conduction de quelques matériaux de construction

Matériaux	Masse volumique, kg/m³	Coefficient de conduction, $\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}$
Laine minérale	200-400	0,05-0,08
Panneaux de tourbe	300	0,08
Panneaux de fibre de bois	300	0,04
Panneaux de liège	150	0,04
Briques en place	1800	0,7
Béton	2000-2400	1,10-1,33
Granit	2600	2,5
Plastiques poreux	20	0,03
Verre mousse	250-300	0,05-0,07
Acier	7850	50

§ 10. CHALEUR SPÉCIFIQUE

On appelle chauleur spécifique la propriété d'une matière d'absorber une certaine quantité de chaleur en s'échauffant.

Pour réchauffer G kg de matière de la température t_2 à la température t_1, il faut dépenser une certaine quantité de chaleur Q qui est directement proportionnelle au poids de la matière et à la différence des températures :

$$Q = cG(t_1 - t_2), \text{ en kcal,} \quad (15)$$

c étant le coefficient de chaleur spécifique.

La formule (15) nous donne :

$$c = \frac{Q}{G(t_1 - t_2)}, \text{ en kcal/kg}\cdot{}^{\circ}\text{C.} \quad (16)$$

Avec $G = 1$ kg et $t_1 - t_2 = 1$ °C, nous obtenons numériquement :

$$c = Q, \text{ en kcal.} \quad (17)$$

Autrement dit, la chaleur spécifique est la quantité de chaleur, exprimée en kilocalories, nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 kg de la matière considérée.

La chaleur spécifique prend les valeurs suivantes dans les divers matériaux de construction : matériaux de maçonnerie naturels ou artificiels, 0,18 à 0,22 ; bois divers 0,57 à 0,65 ; les chaleurs spécifiques des métaux sont très faibles, par exemple : acier 0,11. C'est l'eau qui possède la chaleur spécifique la plus élevée, soit $c = 1$ kcal/kg·°C.

La chaleur spécifique des matériaux est importante dans le bâtiment quand il s'agit de contrôler la stabilité à la chaleur des murs et des planchers, ou encore de calculer le réchauffage nécessaire des matériaux au cours des travaux de construction (bétonnage et maçonnerie) en hiver. Elle est également essentielle dans le calcul des fours.

On appelle stabilité des murs et des planchers à la chaleur le pouvoir qu'ils ont de conserver sur la face intérieure une température plus ou moins constante malgré les fluctuations thermiques dues aux variations du chauffage de même que la hausse de la température produite par les rayons du soleil. Dans les immeubles d'habitation, la fluctuation journalière de la température ne doit pas dépasser 6 °C.

Au cours du chauffage, les faces intérieures des murs et des planchers d'un bâtiment accumulent de la chaleur. Ceci empêche la température de s'élever fortement à l'intérieur des locaux. Lorsqu'on cesse de chauffer, la chaleur accumulée dans les murs et les planchers est consommée de nouveau pour réchauffer l'air, ce qui amortit les fluctuations de la température de l'air à l'intérieur des locaux. Il est avantageux d'employer des matériaux ayant une chaleur spécifique aussi faible que possible pour les murs et les planchers des habitations et bâtiments chauffés. Le bois, largement employé dans les murs et les planchers des petites maisons chauffées, possède précisément ces propriétés.

§ 11. RÉSISTANCE AU FEU

La *résistance au feu* ou *incombustibilité* est la propriété que possède un matériau de résister à des températures élevées et à l'eau (en cas d'incendie) sans être détruit. Au point de vue de la résistance au feu, on classe les matériaux de construction en trois groupes : matériaux incombustibles, matériaux difficilement combustibles et matériaux combustibles.

Les *matériaux incombustibles* soumis à l'action du feu ou d'une température élevée ne s'enflamment pas, ne se décomposent pas et ne se calcinent pas. Sous l'action d'une température élevée, certains matériaux incombustibles ne se déforment que très peu (par exemple les briques, les tuiles, le béton, les matériaux contenant de l'amiante) ; d'autres peuvent au contraire se déformer fortement (acier) ou bien être complètement détruits (certaines pierres naturelles telles que le granit, le marbre).

Les *matériaux difficilement combustibles* soumis à l'action du feu ou d'une température élevée s'enflamment difficilement, mais se consument et se calcinent. Ces matériaux (fibrolite, feutre imprégné d'argile, etc.) ne se consument qu'en présence d'une flamme et cessent de se consumer dès que la flamme est éloignée.

Les *matériaux combustibles* (bois, rubéroïde, carton goudronné, matières plastiques, etc.) soumis à l'action du feu ou d'une température élevée s'enflamment ou bien se consument et continuent à brûler ou à se consumer la flamme une fois éloignée.

§ 12. RÉSISTANCE À LA CHALEUR

La résistance à la chaleur (thermorésistance, pouvoir réfractaire) est la propriété que possède un matériau de résister sans se déformer à l'action prolongée de températures élevées.

Dans la construction de diverses installations de chauffage (fours, tuyauteries, maçonneries de chaudières, etc.), on emploie des matériaux de construction qui peuvent non seulement supporter l'action des températures élevées, mais encore supporter une certaine charge à une température élevée et constante. Ces matériaux se classent en trois groupes : matériaux réfractaires, supportant des températures supérieures à 1 580 °C (chamotte, silice réfractaire, etc.) ; matériaux difficilement fusibles, résistant à des températures comprises entre 1 350 et 1 580 °C; matériaux facilement fusibles, ne pouvant résister qu'à des températures inférieures à 1 350 °C (par exemple, briques ordinaires en argile).

§ 13. STABILITÉ CHIMIQUE

La stabilité chimique ou résistance à la corrosion est la propriété que possède un matériau de résister à l'action des acides, des bases, ainsi qu'à celle des gaz et des sels dissous dans l'eau.

Les matériaux de construction sont souvent exposés en service à des attaques chimiques provenant de liquides et de gaz agressifs. Par exemple, les liquides s'écoulant dans les canalisations peuvent contenir des acides ou des bases libres, selon la nature des eaux résiduaires rejetées par les entreprises industrielles. L'eau de mer contient une grande quantité de sels dissous, et ces sels peuvent détériorer les constructions en béton.

La plupart des matériaux de construction ne résistent pas à l'action des acides et des bases. Le bois, par exemple, est extrêmement peu résistant à ce point de vue ; c'est pourquoi il n'est que rarement utilisé dans les usines chimiques. Les produits bitumineux sont assez rapidement détruits par les solutions alcalines concentrées, et de nombreux matériaux de construction naturels tels que les calcaires, les marbres, les dolomites, etc., sont aussi détruits

par les acides. La plupart des ciments résistent de même mal aux acides.

Les matériaux céramiques à masse très compacte résistent bien aux bases et aux acides, par exemple : les plaques de revêtement, les carreaux pour sols, les tuyaux d'assainissement, les briques spéciales employées dans des égouts, etc. Certaines pierres naturelles comme le basalte résistent très bien aux acides.

§ 14. RÉSISTANCE MÉCANIQUE

La *résistance mécanique* est la propriété que possède un matériau de ne pas être détruit sous l'action de contraintes suscitées par des charges ou d'autres facteurs.

L'étude de cette propriété extrêmement importante fait l'objet d'une science spéciale : résistance des matériaux. Dans ce manuel, on ne parlera que d'une façon succincte de la résistance mécanique et seulement dans la mesure où cela sera nécessaire à l'étude des matériaux de construction.

Les matériaux, sollicités par des charges diverses dans les constructions, sont soumis de ce fait à des contraintes de compression, de traction, de flexion, de cisaillement et des chocs. Le plus souvent, ces matériaux travaillent à la compression ou à la traction.

Les pierres naturelles, les bétons et les briques résistent bien à la compression, mais beaucoup moins bien au cisaillement, et encore moins bien à la traction. Leur résistance à la traction est 10 à 15 fois inférieure à leur résistance à la compression. C'est pourquoi de tels matériaux doivent surtout être employés dans des structures qui travaillent à la compression. D'autres matériaux de construction (par exemple, le bois et l'acier) donnent de bons résultats dans des éléments travaillant à la fois à la compression et à la traction (poutres).

La contrainte de compression ou de traction centrée est égale à l'effort agissant sur 1 cm^2 de la section transversale du matériau.

On calcule la contrainte de compression ou de traction centrée σ, en divisant l'effort P par la section transversale initiale :

$$\sigma = \frac{P}{F}, \text{ en kg/cm}^2. \quad (18)$$

La résistance mécanique (ou simplement résistance) des matériaux de construction s'exprime par la résistance limite, ou charge de rupture, à la compression ou à la traction.

On appelle limite de résistance, *ou* charge de rupture, *la contrainte qui provoque la destruction de l'échantillon du matériau.*

La charge de rupture à la compression ou à la traction $R_{\pm}$ (signe + en traction et signe — en compression) est égale au quotient de la force P_r provoquant la rupture par la section transversale initiale de l'échantillon :

$$R_{\pm} = \frac{P_r}{F}, \text{ en kg/cm}^2. \quad (19)$$

On détermine la charge de rupture en chargeant les échantillons de matière étudiée jusqu'à rupture (dans des presses ou dans des machines d'essai de rupture).

Les échantillons, ou éprouvettes, employés dans les essais de compression ont habituellement la forme de cubes dont les côtés peuvent varier de 2 à 30 cm. L'échantillon doit être d'autant plus grand que la structure du matériau est moins homogène. Les mortiers sont soumis à l'épreuve de traction dans des éprouvettes en forme de 8 dont les dimensions et la configuration sont normalisées (fig. 2).

Les éprouvettes essayées à la compression n'ont pas toujours la forme de cubes, mais parfois celle de cylindres et de prismes. L'avantage des cylindres sur les cubes est qu'on peut les préparer sur des tours spéciaux, même quand il s'agit des roches les plus dures. En outre, les cylindres peuvent être obtenus avec des moules plus simples.

Les résultats des essais de résistance dépendent dans une certaine mesure de la forme et des dimensions de l'éprouvette. Les prismes et cylindres allongés suivant l'axe ont une limite de rupture à la compression inférieure à celle des cubes. Les prismes courts, dont la hauteur est plus petite que les côtés de la base, ont une limite de rupture à la compression supérieure à celle des cubes. Cela tient à ce que la compression s'accompagne d'une dilatation transversale. Deux plans de l'éprouvette essayée s'appliquent aux plateaux de la presse, et les forces de frottement qui apparaissent empêchent les parties de l'éprouvette appliquées aux plateaux de se dilater transversalement et par conséquent d'être détruites. L'effet

des plans d'appui sur la résistance d une éprouvette est d'autant plus faible que la hauteur relative de l'éprouvette est plus grande.

Dans de nombreux cas, la résistance dépend également des dimensions des éprouvettes essayées : les éprouvettes constituées par de petits cubes donnent une résistance plus élevée que celle qu'on obtient avec de grands cubes.

Il faut respecter strictement les prescriptions concernant les formes et dimensions normalisées des éprouvettes des matériaux essayés, l'usinage de leurs plans, la vitesse d'augmentation de la charge, etc. Les conditions d'exécution des essais

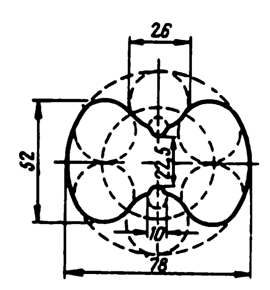


Fig. 2. Eprouvette de forme spéciale pour essais de traction

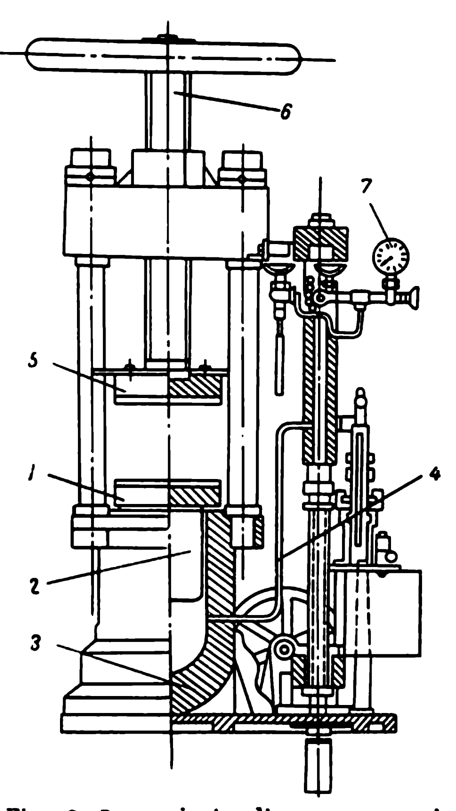


Fig. 3. Presse hydraulique pour essais de résistance à la compression

sont indiquées dans les normes correspondant à chaque matériau.

On détermine la charge de rupture à la compression dans une presse hydraulique (fig. 3).

L'éprouvette essayée est placée sur le plateau *1* solidaire du piston *2* de la presse. Une pompe refoule dans le cylindre *3*,

par la conduite *4*, une huile de machine de viscosité déterminée. Sous l'effet de la pression d'huile, le piston *2* s'élève et l'éprouvette se trouve comprimée entre le plateau *1* qui s'élève et le plateau *5* dont la position en hauteur est réglée à l'aide de la vis *6*. La pression de l'huile dans le cylindre est indiquée par le manomètre *7*.

La charge de rupture des matériaux de construction à la compression est très variable. Elle peut en effet varier de 5 kg/cm² (plaques de tourbe) jusqu'à 10 000 kg/cm² et davantage (aciers spéciaux à haute résistance). Nous donnons ci-après les charges de rupture à la compression de quelques matériaux de construction :

Matériaux	Charge de rupture à la compression, kg/cm²
Granit	1000-2200
Pierre calcaire compacte	100-1500
Brique ordinaire en argile	75-150
Béton	50-600
Pin	300-450
Chêne	400-450
Acier Ст.3	3800-4500

On soumet également souvent les matériaux de construction à l'essai de flexion. Cet essai est le plus simple. Il ne nécessite qu'une charge de rupture relativement faible. Aussi, on peut le faire soit en laboratoire, soit en chantier.

Dans les essais de flexion, les éprouvettes constituées par de petites poutres ou de petites dalles sont placées sur deux supports et sollicitées par une ou deux charges concentrées jusqu'à rupture.

On calcule la contrainte à la flexion σ_f en se servant des formules bien connues de la résistance des matériaux :

charge concentrée en un seul point et poutre de section rectangulaire :

$$\sigma_f = \frac{M}{W} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \text{ en kg/cm}^2, \quad (20)$$

deux charges égales agissant symétriquement par rapport à l'axe de la poutre :

$$\sigma_f = \frac{3P(l-a)}{bh^2}, \text{ en kg/cm}^2, \quad (21)$$

M étant le moment fléchissant, en kg·cm ;

W le moment résistant de la section transversale de la poutre, en cm³ (pour une section rectangulaire $W = \frac{bh^2}{6}$) ;
P la charge, en kg ;
l la travée de la poutre entre appuis, en cm ;
b et h (respectivement) la largeur et la hauteur de la section transversale, en cm ;
a l'espacement entre les charges, en cm.

On convient de calculer la résistance limite à la flexion σ_{rf} en se servant des formules (20) et (21), en substituant dans ces formules la charge de flexion par la charge produisant la rupture.

Dans un essai de flexion, les matériaux de construction commencent généralement à se rompre dans la zone inférieure tendue. Cela tient à ce que, dans la plupart des matériaux (à l'exception de l'acier et du bois), la charge de rupture à la traction est inférieure à celle à la compression.

Dans les matériaux de construction en place, c'est-à-dire travaillant dans des ouvrages, la contrainte que l'on peut admettre n'est qu'une fraction de la charge de rupture σ_{rf}. Cette contrainte admissible a donc pour valeur :

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{rf}}{Z}, \text{ en kg/cm}^2, \qquad (22)$$

Z étant la marge ou facteur de sécurité dont la valeur est toujours supérieure à l'unité (généralement, 2—3 et davantage).

Cette condition imposée à la contrainte admissible s'explique de la façon suivante :

1) les résultats des essais de résistance ne sont que des valeurs moyennes de la résistance du matériau. Le matériau n'étant pas homogène se brise dans des zones les plus faibles avant que la contrainte atteigne la charge de rupture moyenne. On doit donc adopter un facteur de sécurité d'autant plus grand que le matériau est moins homogène ;

2) de nombreux matériaux se déforment fortement lorsqu'ils sont chargés jusqu'à une contrainte qui n'est qu'une fraction de la charge de rupture (50 à 70%) ;

3) dans les matériaux de maçonnerie ainsi que dans d'autres matériaux fragiles, des fissures apparaissent avant que la contrainte atteigne la valeur de la charge de rupture ;

4) en présence de charges alternatives répétées, le phénomène qu'on appelle fatigue du matériau peut provoquer la rupture de celui-ci pour une contrainte ne dépassant pas la moitié de la charge de rupture ;

5) les propriétés initiales du matériau sont modifiées par l'action de l'atmosphère extérieure. Avec le temps, le matériau vieillit et sa résistance mécanique diminue.

Les normes concernant les études des projets prescrivent des facteurs de sécurité déterminés pour les divers matériaux et constructions, afin d'assurer aux ouvrages une résistance suffisante en présence des facteurs énumérés et de certaines charges dont les calculs ne tiennent pas compte (ou bien ne tiennent compte qu'imparfaitement par suite de l'imperfection des méthodes de calcul).

§ 15. DURETÉ

On appelle d u r e t é la propriété que possède un matériau de s'opposer à la pénétration d'un corps étranger plus dur. Cette propriété des matériaux ne correspond pas toujours à leur résistance mécanique ou charge de rupture. Des matériaux dont les charges de rupture à la compression diffèrent, peuvent avoir à peu près la même dureté.

Tableau 3

Echelle des duretés des minéraux

Indice	Matière	Caractéristique de dureté
1	Talc ou craie	Facilement rayés avec l'ongle
2	Sel gemme ou gypse	Rayés avec l'ongle
3	Calcite et anhydrite	Facilement rayés avec une lame d'acier
4	Spath fluor (fluorine)	Rayé par une lame d'acier sous légère pression
5	Apatite	Rayée par une lame d'acier sous forte pression. Ne raie pas le verre
6	Orthoclase (feldspath)	Raie légèrement le verre. N'est pas rayée par une lame d'acier
7	Quartz	Raient facilement le verre. Ne sont pas rayés par une lame d'acier
8	Topaze	
9	Corindon	
10	Diamant	

Il existe plusieurs procédés pour éprouver la dureté des matériaux. Ne peuvent être comparés que les indices obtenus par un même procédé.

On exprime la dureté des minéraux homogènes à l'échelle des duretés. Cette échelle comprend 10 minéraux spécialement choisis et rangés dans un ordre tel que chacun d'eux est rayé par les suivants (tableau 3).

L'indice de dureté choisi pour exprimer la dureté d'un échantillon essayé est compris entre les nombres qui caractérisent les deux minéraux contigus à l'échelle des duretés. Par exemple, si une matière essayée est rayée par l'orthoclase et si elle raie elle-même l'apatite, la dureté de cette matière sera de 5,5.

Pour déterminer la dureté des bois, des aciers et des bétons, on place une bille d'acier sur l'éprouvette en lui imprimant un effort déterminé, et l'on mesure la profondeur de l'empreinte.

§ 16. ABRASIVITÉ

On appelle **abrasivité** la capacité que possède un matériau de perdre du poids et du volume sous l'action

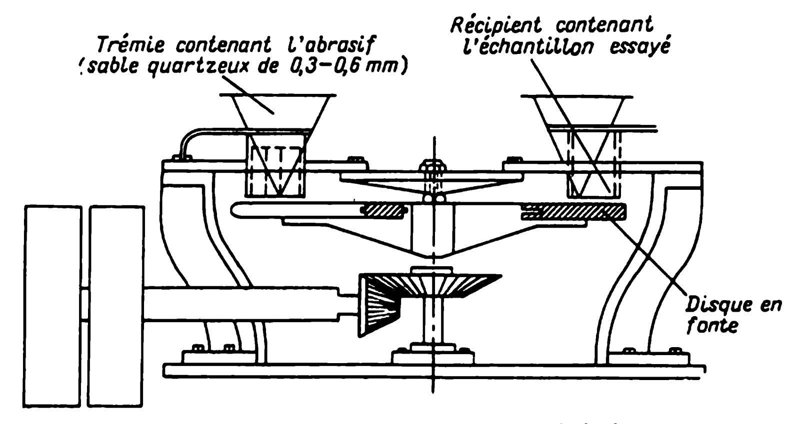


Fig. 4. Meule pour essais de résistance à l'abrasion

de forces de frottement. L'abrasivité a une grande importance pour les matériaux qui subissent des actions abrasives en service (par exemple, matériaux pour sols, escaliers, soutes à charbon et trémies).

On essaie les matériaux à l'abrasion en laboratoire à l'aide de machines spéciales. L'organe principal d'une telle machine (fig. 4) est une meule rotative en fonte contre laquelle on appuie un cube ou un cylindre de la matière essayée, sous une pression déterminée. On répand une quantité déterminée de matière abrasive sur la meule rotative. La matière abrasive employée est un sable quartzeux pour les matières tendres, et du corindon pour les matières dures. La vitesse de rotation de la meule en fonte est calculée de manière que le parcours d'abrasion ait une longueur prescrite.

Si G et G_1 sont les poids de l'éprouvette avant et après l'essai, et F la surface d'abrasion, l'abrasivité sera donnée par la formule :

$$A = \frac{G - G_1}{F}, \text{ en g/cm}^2. \quad (23)$$

A titre d'exemple, nous donnons ci-après les abrasivités moyennes de quelques matériaux :

Matériaux	Abrasivité, g/cm²
Granit	0,10—0,50
Quartzite	0,06—0,12
Carreaux céramiques pour sols	0,25—0,30
Pierre calcaire	0,30—0,80

§ 17. RÉSISTANCE AU CHOC

La résistance au choc est la résistance qu'offre un matériau à la rupture par choc.

Dans certains éléments de construction (sols, revêtements de routes, trémies) les matériaux sont soumis non seulement à des actions abrasives, mais encore aux chocs. Les essais aux chocs se font à l'aide de machines spéciales (fig. 5).

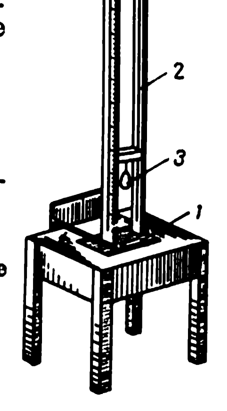


Fig. 5. Appareil dit « sonnette » pour essais de résistance au choc

L'éprouvette de matériau est placée sur une chape de sable *1* entre les deux montants *2*. Une masse *3* suspendue à une hauteur déterminée au-dessus de l'éprouvette tombe à plusieurs reprises sur cette éprouvette jusqu'à la rompre, c'est-à-dire jusqu'à l'apparition de la première fissure.

Le travail total dépensé pour rompre l'éprouvette (en kgm) rapporté à l'unité de volume du matériau (en cm^3) caractérise la résistance du matériau au choc (en kgm/cm^3).

§ 18. ÉLASTICITÉ

L'élasticité d'un matériau est la propriété que possède ce matériau de reprendre sa forme initiale lorsqu'il est libéré de la charge qui l'a plus ou moins déformé. Le retour à la forme initiale peut être complet ou parfait, quand la charge est faible, ou, au contraire, incomplet quand la charge est forte. Dans ce dernier cas, le matériau conserve ce qu'on appelle déformation résiduelle.

On appelle limite d'élasticité la contrainte pour laquelle la déformation résiduelle commence à atteindre, pour la première fois, une certaine valeur (bien faible) fixée par des spécifications techniques pour chaque matériau considéré. Cette contrainte est la contrainte maximale pour laquelle le matériau ne subit pratiquement que des déformations élastiques qui disparaissent lorsqu'on supprime la charge.

§ 19. PLASTICITÉ ET FRAGILITÉ

On appelle plasticité la propriété que possède un matériau de modifier ses dimensions et sa forme sous l'action des forces extérieures sans que des fissures se produisent et de conserver sa nouvelle forme après suppression de la charge.

Outre les matériaux plastiques (acier, bitume, bois, pâte d'argile, etc.), on rencontre des matériaux fragiles qui se brisent d'un coup, sans aucune déformation préalable, dès que les efforts qui les sollicitent atteignent la valeur de la charge de rupture. Les matériaux fragiles sont caractérisés par le fait qu'il existe une différence importante entre la charge de rupture à la compression et la charge de rupture à la traction. Par exemple, la charge de rupture à la traction

des pierres naturelles telles que le granit ne dépasse pas 1/40 à 1/60 de la charge de rupture à la compression. Les matériaux fragiles résistent également mal aux chocs.

La fragilité et la plasticité des matériaux peuvent varier fortement en fonction de certains facteurs tels que l'humidité, la température, la vitesse de croissance des sollicitations. Par exemple, certains bitumes sont fragiles sous une charge augmentant rapidement, et plastiques, sous une charge augmentant lentement. L'argile est fragile à l'état sec et plastique à l'état humide.

CHAPITRE II

MÉTAUX EMPLOYÉS DANS LA CONSTRUCTION

§ 1. CLASSIFICATION DES MÉTAUX

Les métaux employés dans la construction se classent en métaux ferreux et non ferreux.

Parmi les métaux ferreux la fonte et l'acier, qui sont des alliages de fer avec le carbone, le silicium, le manganèse, le phosphore, le soufre et d'autres éléments chimiques, trouvent une large application.

La classification des produits ferreux en fonte et en acier repose sur la teneur en carbone de l'alliage.

La f o n t e est un alliage de fer et de carbone contenant plus de 2% de carbone. Les fontes ordinaires contiennent 4% de carbone au maximum.

L'a c i e r est un alliage de fer et de carbone dans lequel la teneur en carbone peut atteindre 2%. On distingue les aciers suivants en fonction de leur teneur en carbone :

aciers à bas carbone, contenant 0,25% maximum de carbone ;

aciers à teneur moyenne de carbone contenant entre 0,25 et 0,6% de carbone ;

aciers à carbone élevé, contenant plus de 0,6% de carbone.

Les propriétés des aciers varient considérablement en fonction de la teneur en carbone : la plasticité diminue et la fragilité augmente.

Dans les constructions qui subissent des charges dynamiques pendant leur montage ou leur exploitation, on emploie de préférence des aciers à bas carbone.

Dans les aciers et les fontes, la teneur en autres éléments mentionnés plus haut (silicium, manganèse, phosphore et soufre) peut dépasser 1% dans les aciers et 2 à 4% dans les fontes.

Pour améliorer les qualités techniques des fontes et des aciers, on leur ajoute divers éléments d'a l l i a g e : manganèse, chrome, nickel, molybdène, aluminium, cuivre.

On appelle aciers à *faible alliage*, les aciers dans lesquels la teneur totale en éléments d'alliage ne dépasse pas 2,5%. Les aciers *moyennement alliés* ont une teneur en alliages comprise entre 2,5% et 10%; dans les aciers à *fort alliage* cette teneur dépasse 10%. Dans la construction on emploie principalement les aciers à faible alliage.

Les fontes en teneur élevée de soufre, de manganèse et de phosphore, ainsi que les fontes contenant des éléments d'alliage sont appelées fontes *alliées*.

L'addition des éléments d'alliage permet d'accroître la résistance à la corrosion, d'élever la forgeabilité, l'élasticité et autres propriétés importantes de construction des métaux ferreux. Par exemple, les aciers inoxydables sont des alliages de fer et de carbone à forte teneur d'éléments d'alliage.

Les aciers alliés sont plus chers que les aciers ordinaires, d'où leur emploi limité.

On divise les *métaux non ferreux* en métaux légers et métaux lourds.

L'aluminium et le magnésium sont les métaux de base des métaux légers et de leurs alliages. Le duralumin, qui est le représentant caractéristique de ces alliages, est un alliage qui contient 92 à 95% d'aluminium et 5 à 8% de cuivre, de manganèse, de fer, de magnésium et de silicium.
Le duralumin tend à être de plus en plus employé dans la construction à cause de sa légèreté. Il va à la fabrication des cornières, semelles, barres, tuyaux et autres pièces façonnées ou architecturales. La résistance mécanique du duralumin n'est pas inférieure à celle des aciers (sa limite de compression dépasse 4 000 kg/cm^2).

Les éléments essentiels des métaux lourds et de leurs alliages sont le cuivre, l'étain, le zinc et le plomb. Les alliages des métaux lourds et non ferreux sont employés dans la construction sous forme de bronze [alliage de cuivre (90%) et d'étain], de laiton [alliage de cuivre (60%) et de zinc]. On produit également des bronzes en alliant le cuivre avec l'aluminium, le fer, le manganèse, c'est-à-dire des *bronzes sans étain*.

Pour certains éléments de toitures, des tuyaux d'écoulement d'eau, ainsi que d'autres éléments particulièrement soumis à la corrosion, on emploie des tôles zinguées qui se

distinguent par leur résistance élevée aux agents atmosphériques.

Les laitons et les bronzes servent à la fabrication de pièces à aspect décoratif dans les réseaux sanitaires ainsi que pour d'autres buts spéciaux.

Les métaux non ferreux sont très chers ; leur prix est plusieurs fois celui des métaux ferreux. D'où leur emploi aménagé et économique, les remplaçant si possible par des métaux et alliages ferreux à meilleur marché.

§ 2. PRODUCTION DE LA FONTE ET DE L'ACIER

Les opérations métallurgiques ont pour but d'obtenir à partir des minerais naturels des produits de forme et de qualité nécessaires. Le schéma (page 33) représente les opérations de traitement des minéraux dans le but d'obtenir la fonte et l'acier ainsi que les pièces diverses fabriquées avec ces métaux.

a) Production de la fonte

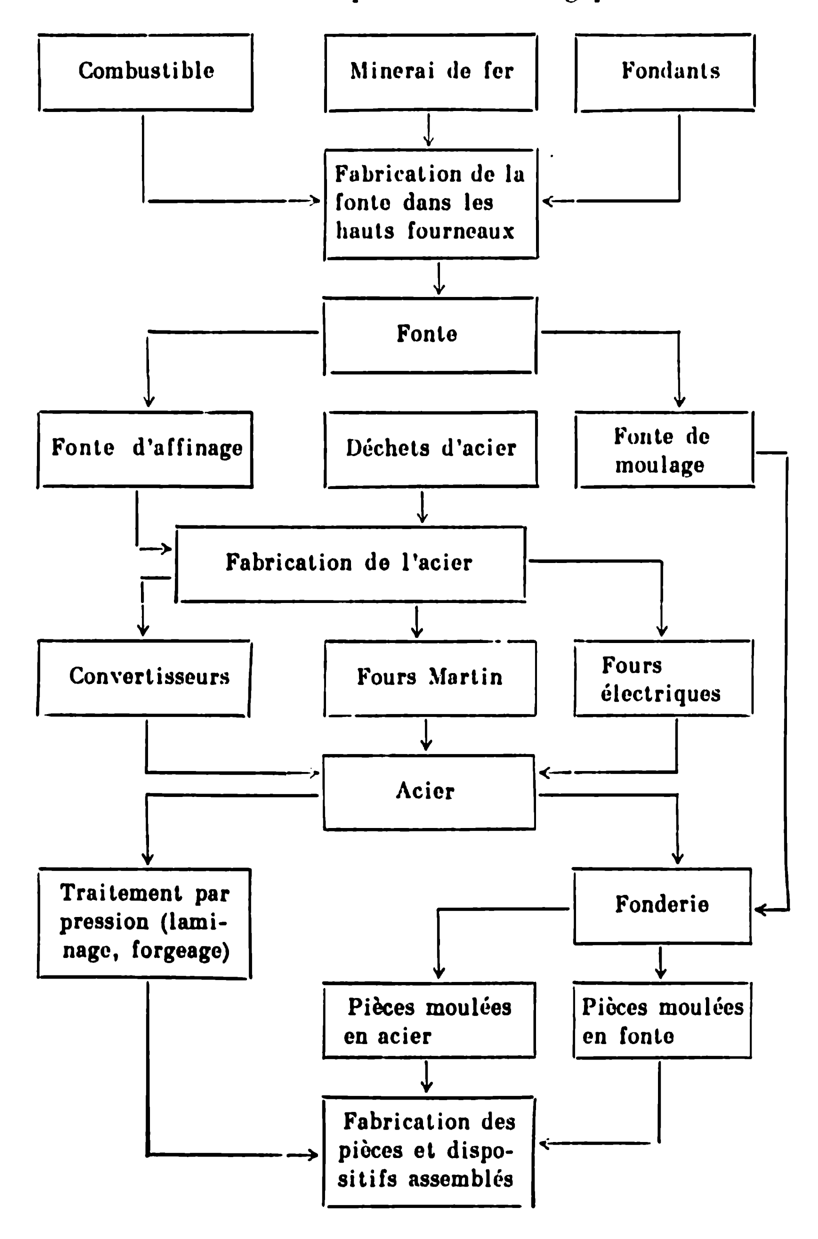
La production de la fonte représente l'opération primaire de l'obtention d'un métal à partir d'une matière première naturelle qui est le minerai de fer. Les matières premières employées dans les hauts fourneaux pour obtenir la fonte sont les suivantes :

les minerais de fer: la magnétite (Fe_3O_4), l'hématite rouge (Fe_2O_3), l'hématite brune, ou oxyde de fer hydraté, ($2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$) et le fer spathique ($FeCO_3$). Dans la magnétite et l'hématite rouge, la teneur en fer atteint 70%, tandis qu'elle ne dépasse pas 50 à 60% dans l'hématite brune et dans le fer spathique. Les meilleurs minerais de fer sont ceux qui contiennent de l'hématite rouge. Ce sont ceux qui contiennent le moins d'impuretés nuisibles, comme le phosphore et le soufre, ayant, toutefois, une forte teneur en fer ;

le combustible, le coke, est un produit de distillation sèche de certaines espèces de charbon. Dans les hauts fourneaux, le coke n'est pas seulement un combustible qui fait fondre le minerai, c'est également un réducteur du fer à partir de ses oxydes.

Les flux (ou fondants), calcaire, sable, etc., servent à abaisser la température de fusion des matières inertes

Schéma des opérations métallurgiques



(stériles) contenues dans le minerai et à transformer ces matières ainsi que les cendres du combustible en scories.

La réduction du fer à partir de son minerai se fait dans les hauts fourneaux (fig. 6). On introduit successivement par le haut du haut fourneau des charges de minerai, de combustible (coke) et de fondant. L'air chaud est amené par le bas, à travers des tuyères. L'oxyde de carbone CO, formé lors de la combustion, réduit les oxydes de fer jusqu'à l'état de fer pur, en passant par les réactions suivantes :

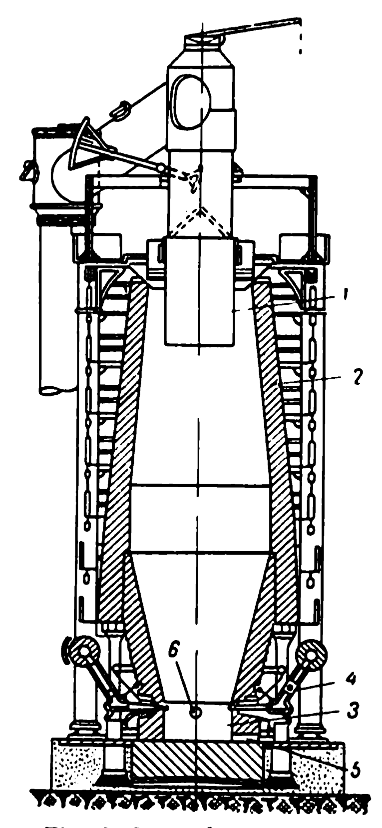


Fig. 6. Haut fourneau:
1 — gueulard ; 2 — cuve ; 3 — creuset ; 4 — tuyères à vent ; 5 — coulée de la fonte ; 6 — coulée du laitier

$$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2;$$
$$2Fe_3O_4 + 2CO \rightarrow 6FeO + 2CO_2;$$
$$6FeO + 6CO \rightarrow 6Fe + 6CO_2.$$

Le carbone et l'oxyde de calcium (CaO), obtenu par décomposition du calcaire, réduisent également le manganèse, le soufre, le phosphore et la silice contenus dans le minerai.

Le fer provenant de la réduction réagit partiellement dans la partie inférieure du four avec le carbone et donne du carbure de fer (Fe_3C), ce qui fait augmenter de 3 à 4 % la teneur en carbone dans la fonte. La fonte obtenue commence à fondre approximativement à 1 300 °C et s'égoutte dans le creuset.

Les réactions entre matières inertes et fondants donnent des combinaisons facilement fusibles qui passent à l'état liquide à des températures élevées (scories). Les scories surnagent la fonte liquide car celle-ci est plus lourde. Au fur et à mesure que la fonte s'accumule dans le creuset du

haut fourneau, on la fait sortir à travers un trou de coulée, ayant évacué au préalable les scories par le trou de crasse.

Au résultat du processus qui se déroule dans le haut fourneau on obtient de la fonte, des scories et du gaz de gueulard.

D'après leurs propriétés et leur destination, les fontes se divisent en :

fontes de moulage destinées à la fabrication de pièces moulées en fonte (coussinets de colonnes, pièces de réseaux sanitaires, tuyaux, etc.) ;

fontes d'affinage destinées à la fabrication de l'acier ;

fontes spéciales (ferro-alliages) que l'on additionne dans le but d'améliorer les qualités des aciers fabriqués.

Les scories de hauts fourneaux. La production d'une tonne de fonte s'accompagne par celle d'une quantité de scories pouvant atteindre 0,6 tonne. Les scories de hauts fourneaux sont très employées dans la fabrication de liants et de matières calorifuges. Pour améliorer les qualités des scories, on les rend granuleuses par refroidissement brusque des scories liquides.

Le gaz de hauts fourneaux (de gueulard). Sur une tonne de fonte produite tombe de 3 000 à 3 500 m^3 de gaz combustible qui se dégage du four. Ce gaz est un combustible précieux pour les usines métallurgiques.

b) Production de l'acier

La teneur élevée en carbone dans la fonte la rend fragile et ne permet pas de l'employer dans la fabrication de pièces de construction exposées à des charges dynamiques. Outre le carbone, la fonte contient également d'autres impuretés nuisibles : soufre, phosphore, silicium, qui réduisent également sa qualité. A l'inverse de la fonte, l'acier contient une faible quantité de carbone et presque pas ou absolument aucune autre impureté.

Pour obtenir de l'acier résistant et élastique à partir de la fonte, il faut donc réduire la quantité de carbone et des autres impuretés contenues dans celle-ci.

Il existe trois méthodes de production de l'acier : au convertisseur, au four Martin et aux fours électriques.

La production de l'acier de convertissage consiste en principe à effectuer la purge de la masse de fonte fondue. L'oxygène de l'air réagit avec les impuretés, les oxydes et les transforme en scories.

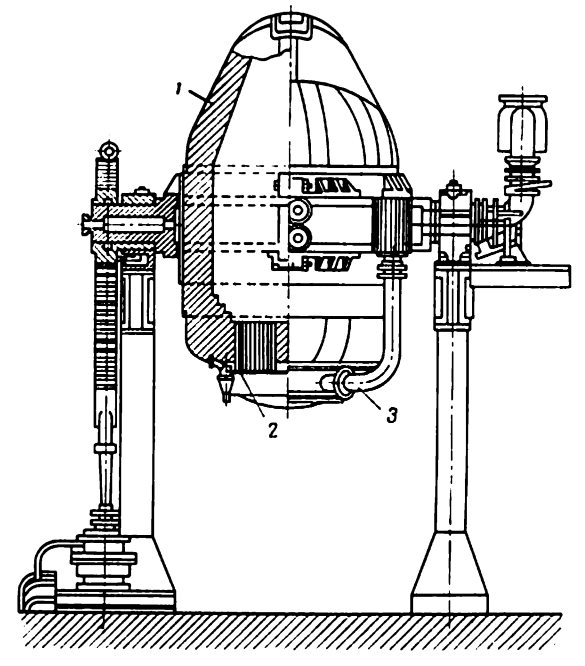


Fig. 7. Convertisseur

Un convertisseur (fig. 7) est une cornue en acier *1*, revêtue à l'intérieur et pouvant basculer autour d'un axe horizontal dans le but d'y verser la fonte et d'en évacuer ensuite l'acier. Dans la partie inférieure du convertisseur, les tuyères *2* permettent l'injection de l'air amené par le tuyau *3*.

Pour qu'une fonte puisse être traitée au convertisseur, il faut qu'elle contienne suffisamment de silicium (de 1 à 1,5%) et de manganèse (de 0,6 à 1%) ou de phosphore. La combustion de ces impuretés pendant la purge produit en effet une quantité de chaleur importante, nécessaire pour maintenir le métal à l'état liquide.

Le procédé de convertissage est d'un grand débit. Mais l'acier de convertissage contient une grande quantité de

bulles d'air, ce qui nuit à sa qualité et limite son emploi dans les constructions particulièrement résistantes (ponts, rails).

Le procédé Martin diffère du précédent par le fait que l'on fait fondre l'acier sur la sole d'un four Martin

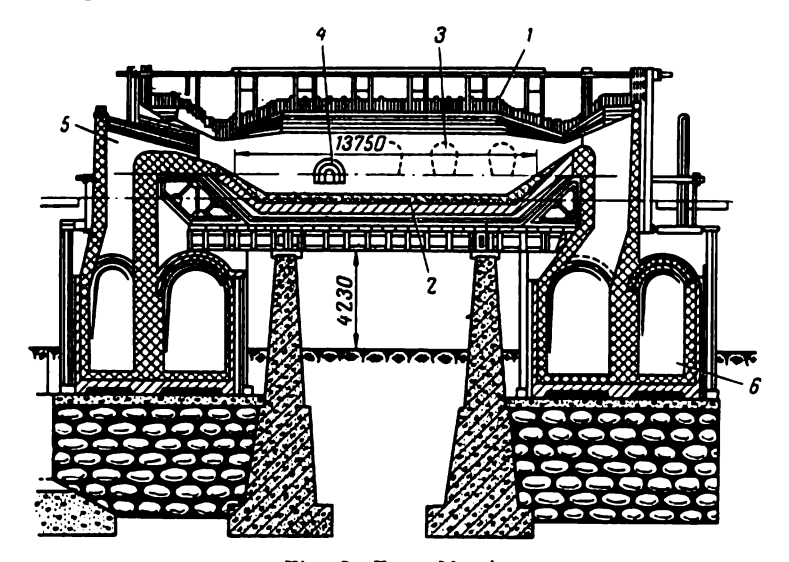


Fig. 8. Four Martin :
1 — voûte ; 2 — sole ; 3 — trou d'enfournement ; 4 — coulée de l'acier ; 5 — canaux de soufflerie ; 6 — coulée du laitier

à flamme. Le four possède une voûte qui réfléchit la chaleur sur le métal et le fait fondre. Le combustible employé pour obtenir la température nécessaire est un combustible gazeux. La figure 8 représente un four Martin.

Les matières premières du procédé Martin sont la fonte et les déchets d'acier. La possibilité d'utiliser les déchets ou riblons d'acier est un grand avantage du procédé Martin sur celui du convertisseur.

On alimente le four Martin successivement en riblons, fondants et fonte. Les fondants et l'oxyde de fer FeO, résultant de l'oxydation du fer, réagissent avec les impuretés nuisibles et les transforment en scories qui surnagent et s'accumulent sur la surface de l'acier. La réaction entre l'oxyde de fer FeO et les impuretés nuisibles (oxydation) transtorme cet oxyde en fer (Fe).

La fonderie d'acier a obtenu actuellement des résultats remarquables. En particulier, on augmente considérablement la productivité des fours Martin en utilisant l'oxygène.

Le procédé Martin n'a pas seulement l'avantage de permettre l'utilisation des riblons ou déchets d'acier. Il permet

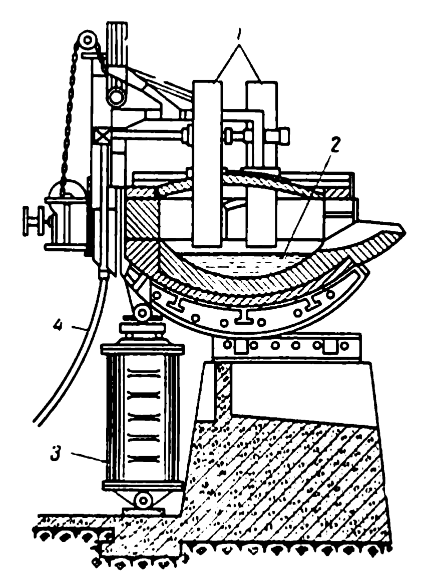


Fig. 9. Four électrique de fusion d'acier :
1 — électrodes ; 2 — cuve ; 3 — mécanisme de basculement ; 4 — câble électrique

également d'obtenir des aciers de qualité supérieure, ayant une composition chimique et des propriétés bien déterminées. Ces aciers sont destinés à la fabrication des pièces de construction de haute responsabilité : armatures (fermes) de bâtiments, ponts, poutres de grues ou de ponts roulants, rails.

A c i e r s   é l e c t r i q u e s. Les aciers à alliages spéciaux et de qualité supérieure sont produits dans des fours électriques dont les plus répandus sont les fours à arc (fig. 9). Dans ces fours, la matière fond sous l'effet de la chaleur dégagée par l'arc électrique qui se forme entre des électrodes et le métal.

La fabrication de l'acier dans les fours électriques est analogue au procédé Martin à part le fait que le four électri-

que n'est alimenté ni en combustible ni en air, nécessaire à sa combustion.

Les aciers électriques coûtent beaucoup plus cher que les aciers de convertissage et les aciers Martin. Cela s'explique par la quantité d'énergie considérable nécessaire à leur fabrication (il faut dépenser 1 000 kWh pour faire fondre une tonne de matière). Néanmoins, la qualité élevée de ces aciers assure un grand avenir à ce genre de procédé.

§ 3. STRUCTURE DES MÉTAUX FERREUX

La métallurgie théorique étudie en particulier la structure et les propriétés mécaniques des métaux. Les initiateurs de cette science et du traitement thermique des métaux sont les savants russes P. Anossov et D. Tchernov.

a) Transformations allotropiques du fer

Les métaux sont des corps cristallins constitués par une infinité de formations cristallines qui se groupent sous forme de grains solidement liés entre eux. Le réseau cristallin formé initialement lors de la solidification de la masse fondue peut se transformer en une autre forme si l'on varie la température du métal solide. Par exemple : la masse fondue se cristallise dans le système cubique centré, qui est le fer delta (fig. 10,*a*) ; après un refroidissement jusqu'à 1 300 °C,

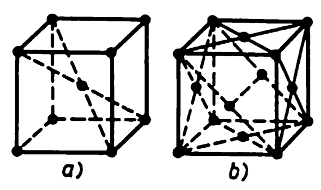


Fig. 10. Structure cristalline des produits sidérurgiques : *a* — système cubique centré ; *b* — système cubique à faces centrées

le réseau cristallin devient un système cubique à faces centrées, qui est le fer gamma (fig. 10,*b*) ; à 898 °C, la transformation donne de nouveau un système cubique centré, le fer bêta et le fer alpha.

La modification du réseau cristallin d'une matière sous l'influence de la température est appelée **transformation allotropique**. L'allotropie du fer a une

grande importance dans le traitement mécanique et thermique de la fonte et de l'acier. Le fer alpha et le fer gamma jouent le rôle principal dans ces traitements.

b) Diagramme de l'état des alliages ferrocarboniques

Les rapports différents en poids du fer et du carbone dans l'alliage modifient radicalement les propriétés techniques du métal. L'acier, contenant jusqu'à 2% de carbone, est élastique et résiste aussi bien aux efforts de compression que de traction. La fonte, au contraire, qui contient plus de 2% de carbone, est un métal fragile résistant mal aux chocs, à la flexion et à la traction.

Les propriétés du métal ne dépendent pas seulement de la teneur en carbone. Elles dépendent également des modi-

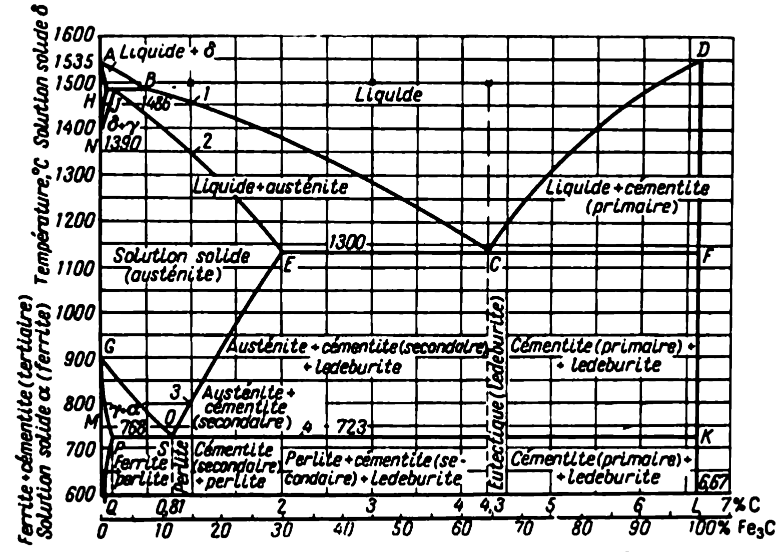


Fig. 11. Diagramme de l'état des alliages ferrocarboniques

fications de la structure qui se produisent à diverses températures critiques déterminées.

L'influence de la température et de la teneur en carbone sur la structure d'un acier est représentée par le diagramme de l'état des alliages fer-carbone (fig. 11). Ce diagramme est

à la base de nombreuses opérations technologiques de fabrication de pièces en métaux ferreux et de leur traitement thermique.

Sur le diagramme des alliages ferrocarboniques, l'axe des abscisses représente la teneur en carbone qui va de 0 jusqu'à 6,67 %. La teneur nulle correspond au fer chimiquement pur Fe, tandis que 6,67 % correspond à la cémentite Fe_3C et représente la teneur limite en carbone dissous dans le métal. On porte la température sur l'axe des ordonnées. La ligne supérieure *ABCD* (appelée l i g n e d u l i q u i d u s) indique qu'à n'importe lequel de ses points commence la cristallisation (solidification), c'est-à-dire la formation de cristaux à partir de la masse liquide. Au-dessous de cette ligne, la masse fondue contient des cristaux dont la proportion augmente au fur et à mesure que la température diminue. A la ligne *AHIECF* (appelée l i g n e d u s o l i d u s), la masse est complètement solidifiée. Le diagramme montre donc que la masse liquide correspond aux températures supérieures à la ligne du liquidus, que la masse solide correspond aux températures inférieures à la ligne du solidus, et qu'il existe à la fois de la matière fondue et de la matière solide (cristaux) dans la région comprise entre ces deux lignes.

Le diagramme montre également que, lorsque la teneur en carbone dans l'alliage augmente de zéro jusqu'à 4,3%, la température initiale de cristallisation diminue, puis augmente de nouveau. Le fer pur commence à se cristalliser à 1 535 °C, tandis que la fonte contenant 4,3% de carbone se cristallise à 1 130 °C et la cémentite, qui contient 6,67% de carbone, commence à se cristalliser à 1 550 °C environ. Parmi tous les alliages ferrocarboniques, c'est celui qui contient 4,3% de carbone qui a la température de fusion la plus basse. Cet alliage se cristallise totalement à 1 130 °C. Cette température minimale de fusion de l'alliage est appelée la température eutectique, et l'alliage correspondant porte le nom d'alliage e u t e c t i q u e.

Considérons les phénomènes qui se déroulent lorsqu'on refroidit un alliage fondu contenant 1% de carbone et 99% de fer, ce qui représente la composition d'un acier à carbone élevé. Au-dessus de 1 450 °C, le mélange est une masse totalement fondue. Quand on refroidit cette masse jusqu'au point *1*, on voit apparaître les premiers cristaux d'une solution d'austénite, et la quantité de cette solution dans le liquide augmente au fur et à mesure que la température dimi-

nue. Au point *2* sur la ligne *JE*, c'est-à-dire à environ 1 340 °C, le liquide a complètement disparu et l'alliage se transforme entièrement en une solution solide d'austénite. Au point *3*, l'austénite se décompose en austénite et en cémentite. Au point *4*, on observe une deuxième décomposition de l'alliage en cémentite et en perlite. On voit donc que l'austénite est stable seulement à des températures élevées, supérieures à 723°C.

Si l'on refroidit un alliage de fonte contenant 3% de carbone on voit également apparaître des cristaux d'austénite à un état qui correspond à la ligne du liquidus. A 1 130 °C, le liquide se solidifie complètement en formant de l'austénite. Celle-ci se décompose immédiatement en un mélange d'austénite, de cémentite et de ledeburite ; l'austénite disparaît complètement du mélange à 723 °C. La solution solide contient des cristaux de perlite, de cémentite et de ledeburite.

Au point *C*, l'alliage contenant 4,3% de carbone (alliage eutectique) se cristallise totalement sous forme de ledeburite.

Si nous observons les phénomènes accompagnant le refroidissement des alliages fondus, nous constatons qu'à certaines températures déterminées qui correspondent à une teneur également déterminée en carbone, le métal en cours de solidification subit une modification de structure. C'est ainsi qu'au point *3* l'austénite se décompose en austénite et cémentite et qu'au-dessous du point *4* l'austénite disparaît complètement. On observe une recristallisation analogue avec d'autres compositions.

Les points où se produit la recristallisation (modification de structure) du métal solidifié sont représentés par les lignes *GS* et *PSK* du diagramme. On les appelle lignes des p o i n t s c r i t i q u e s, et elles déterminent le régime à adopter pour le traitement mécanique à chaud et le traitement thermique de l'acier.

§ 4. TRAITEMENT THERMIQUE DE L'ACIER

La structure de l'acier détermine ses propriétés mécaniques : résistance, dureté, fragilité, plasticité, élasticité, résilience. Si l'on connaît les modifications de structure subies par l'acier à diverses températures, on peut donc obtenir des aciers ayant des propriétés ou caractéristiques techniques

appropriées. On obtient de tels résultats par traitement thermique de l'acier : par son chauffage et son refroidissement suivant des régimes rigoureusement déterminés.

Lors de l'examen du diagramme de l'état des alliages ferrocarboniques, il a été noté plusieurs structures de l'acier (austénite, cémentite, perlite, ledeburite, ferrite) dont chacune possède ses propres caractéristiques mécaniques et physiques :

l'austénite possède une dureté élevée ($H_B = 200$ à 250) ainsi qu'une charge de rupture élevée (jusqu'à 10 000 kg/cm²) ; mais sa limite de fluage est relativement faible (inférieure à 4 000 kg/cm²) ; la plasticité et la résilience sont élevées ;

la cémentite est un alliage extrêmement fragile et dur (H_B peut atteindre 750) ;

la ferrite est un alliage doux ($H_B = 80$), plastique, à faible résistance (3 000 kg/cm²), qui se distingue par une haute résilience ;

la perlite est un mélange de cémentite et de ferrite dont les caractéristiques sont intermédiaires entre celles de ces deux structures : dureté $H_B = 280$, charge de rupture pouvant atteindre 8 500 kg/cm² ;

la ledeburite, qui est un mélange d'austénite et de cémentite, se distingue, comme la cémentite, par une dureté (H_B atteint 650) et une fragilité élevées ;

la martensite est fragile, mais extrêmement dure (H_B atteint 700).

Si l'on refroidit l'acier suivant un régime déterminé, on peut obtenir encore d'autres structures.

Disposant du diagramme des alliages ferrocarboniques et connaissant surtout les points critiques (de Tchernov), on peut obtenir un alliage à caractéristiques exigées, en lui faisant subir un traitement thermique déterminé.

On distingue les traitements thermiques suivants de l'acier: la trempe, le revenu, le recuit et la normalisation.

La trempe de l'acier consiste à le chauffer de 30 à 50 °C au-dessus du point critique (ligne *GS* ou *PSK*), le maintenir un certain temps à cette température et le refroidir ensuite rapidement dans de l'eau, de l'huile ou d'autres liquides. Par exemple, un acier contenant moins de 0,8% de carbone est constitué par de la ferrite et de la perlite (fig. 11) qui ont toutes deux de faibles duretés. Cet

acier doit aller à la fabrication d'une pièce de forte dureté. Dans ce but on le chauffe de 30 à 50 °C au-dessus du point critique (723 °C, ligne *PSK*). A cette température (723 + + 30 à 50 °C), la structure ferrite + perlite se transforme en austénite. Si la pièce est refroidie ensuite rapidement, l'austénite se transforme en martensite, qui est un acier de haute dureté.

Lorsqu'on trempe un acier contenant plus de 0,8% de carbone (par exemple, 1%) à une température supérieure à 723 °C, la structure cémentite + perlite se transforme en une texture austénite + cémentite. Le refroidissement rapide de l'acier effectué ensuite contribue au passage de l'austénite en martensite.

La profondeur de trempe dépend de la vitesse à laquelle elle se fait et ne dépasse pas 10 à 12 mm pour les aciers ordinaires. Si les pièces ont une épaisseur importante, la martensite dure se forme seulement sur la surface, tandis qu'en profondeur le métal conserve son ancienne structure.

Le genre de liquide de refroidissement a une influence sur la trempe. Dans les cas examinés plus haut, par exemple, la martensite se forme au cours d'un refroidissement dans l'eau et dans des solutions aqueuses de diverses substances. On obtient une autre structure si le refroidissement se fait à l'huile.

Le revenu. L'acier trempé se trouve dans un état de contrainte, et il est fragile. Le revenu est un traitement qui a pour but de réduire les tensions internes, et par cette opération, la fragilité de l'acier. Le revenu consiste à chauffer l'acier au-dessous de sa température critique et à le refroidir ensuite progressivement à l'air. Suivant le genre de revenu considéré, la température de chauffage varie de 200 à 500 °C. Le revenu réduit la dureté du métal mais accroît sa résilience.

Le recuit consiste à réchauffer l'acier au-dessus du point critique, le maintenir un certain temps à cette température et à le refroidir ensuite lentement. Le recuit a pour but de réduire la dureté de l'acier et son hétérogénéité de structure.

Les produits sidérurgiques subissent un recuit après coulée, forgeage et laminage.

On appelle normalisation un traitement qui consiste à chauffer l'acier de 30 à 50 °C au-dessus de la ligne *GS* (fig. 11) et le refroidir ensuite à l'air. La normali-

sation permet d'obtenir un acier homogène, à grains fins, possédant une grande dureté et une grande résistance, mais une plasticité inférieure à celle qu'on obtient par le revenu.

§ 5. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MÉTAUX

Divers essais permettent de déterminer la résistance des métaux à la rupture sous l'effet d'efforts mécaniques variés (allongement, compression, flexion, chocs, etc.). On utilise les procédés suivants d'essais mécaniques des métaux :

essais statiques: la charge appliquée à l'échantillon (éprouvette) augmente lentement et régulièrement (c'est ainsi qu'on essaie les métaux à la traction, la compression, la torsion et la flexion) ;

essais dynamiques: la charge augmente brusquement, comme sous l'effef d'un choc.

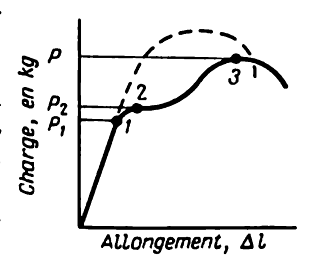


Fig. 12. Diagramme de la traction de l'acier

Résistance d'un métal à la traction. On détermine la résistance d'un métal à des efforts de traction en essayant une éprouvette métallique à section circulaire ou rectangulaire, la soumettant à un effort de traction dans des machines à traction.

La plupart des métaux, et l'acier en particulier, ont des caractéristiques plastiques élevées. Par exemple, une éprouvette en acier qui subit un effort de traction s'allonge d'autant plus que l'effort appliqué est plus grand.

L'augmentation de la longueur de l'éprouvette en fonction de l'effort (ou charge) peut être représentée sous forme de graphique (fig. 12) où l'on porte sur l'axe des ordonnées (axe vertical) l'effort de traction appliqué à l'éprouvette, tandis que les augmentations de la longueur de l'éprouvette sont portées sur l'axe des abscisses (axe horizontal).

La section rectiligne du diagramme de l'allongement, depuis l'origine des coordonnées jusqu'au point *1*, montre que l'allongement Δl est directement proportionnel à l'effort appliqué P_1. Si l'on applique à l'éprouvette un effort égal ou inférieur à P_1 et si l'on décharge ensuite l'éprouvette, celle-ci reprend sa longueur initiale. Il ne subsiste donc

aucune déformation résiduelle. On appelle limite de proportionnalité la tension maximale dont la suppression ne laisse subsister de déformations résiduelles dans l'éprouvette métallique.

La limite de proportionnalité est la tension maximale pour laquelle la déformation est encore proportionnelle à la tension. La limite de proportionnalité correspond à l'extrémité de la section rectiligne de la déformation curviligne.

On peut exprimer par la formule suivante la relation qui existe entre la tension σ et l'allongement Δl de l'éprouvette jusqu'à la limite de proportionnalité

$$\sigma = E\delta, \text{ en kg/cm}^2, \qquad (24)$$

où : σ — tension de traction jusqu'à la limite de proportionnalité,

δ — allongement relatif de l'éprouvette, en %. Cet allongement a pour valeur :

$$\delta = 100 \cdot \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \text{ en } \%, \qquad (25)$$

où l_0 — longueur naturelle de l'éprouvette (avant l'application de la charge) ;

l_1 — longueur de l'éprouvette sous la charge donnée ;

E — coefficient de proportionnalité, appelé module d'élasticité.

Le module d'élasticité a une très grande importance technique. Il caractérise la résistance du métal aux déformations élastiques pendant l'allongement. La déformation du métal est d'autant plus faible que le module d'élasticité est plus grand.

Quand la charge est supérieure à P_1, la longueur de l'éprouvette augmente plus rapidement que la charge. A partir d'une certaine charge P_2, l'éprouvette commence à s'étirer (fluage), bien que la charge reste constante. C'est ce qu'on voit par le palier horizontal de la courbe. On appelle limite de fluage la tension à laquelle apparaît le fluage du métal. Le fluage s'observe seulement dans les aciers à teneur de carbone faible ou moyenne. La limite de fluage constitue la caractéristique fondamentale de la résistance de l'acier dans le calcul des constructions métalliques et en béton armé.

Après avoir subi un allongement quelque peu arbitraire sous une charge constante P_2, le métal est de nouveau capable de résister à une augmentation de la charge jusqu'à P_3 qui finit par le briser.

On appelle résistance mécanique, ou plus correctement charge de rupture, la tension à laquelle se produit la rupture de l'éprouvette :

$$\sigma = \frac{P}{F_0}, \qquad (26)$$

où : σ — charge de rupture en kg/cm^2 ;

P — charge provoquant la rupture de l'éprouvette en kg ;

F_0 — superficie initiale de la section de l'éprouvette en cm^2.

Résistance d'un métal aux chocs. Pour effectuer un essai de choc, on place l'éprouvette (barre de section carrée de 1×1 cm avec une encoche au point du choc) sur un appareil pendulaire (fig. 13). On brise ensuite l'éprouvette par choc du pendule. Cet essai caractérise la résilience du métal.

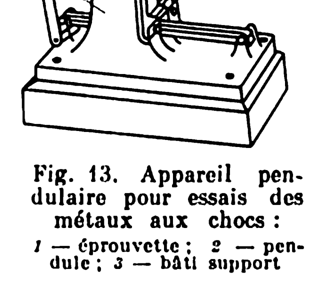


Fig. 13. Appareil pendulaire pour essais des métaux aux chocs : 1 — éprouvette ; 2 — pendule ; 3 — bâti support

La caractéristique numérique adoptée pour exprimer la résilience a est le quotient — énergie A dépensée pour briser l'éprouvette — section F de l'éprouvette au point de rupture :

$$a = \frac{A}{F}, \text{ en kg/cm}^2. \qquad (27)$$

La résilience d'un métal est particulièrement importante dans les constructions supportant des charges dynamiques (ponts, rails de chemins de fer, ou de ponts roulants).

Dureté d'un métal. On détermine la dureté d'un métal en y faisant pénétrer par pression une bille métallique trempée. La caractéristique dite « dureté Brinell » est le quotient de l'effort appliqué sur la bille (en kg) par la surface de l'empreinte laissée par la bille dans le métal.

La profondeur de pénétration de la bille est d'autant plus grande que le métal est plus doux.

E s s a i s t e c h n o l o g i q u e s. On détermine les qualités technologiques d'un métal en pliant une éprouvette jusqu'à l'apparition de fissures. Suivant la nature du métal considéré, on plie le métal d'un certain angle (fig. 14,*a*)

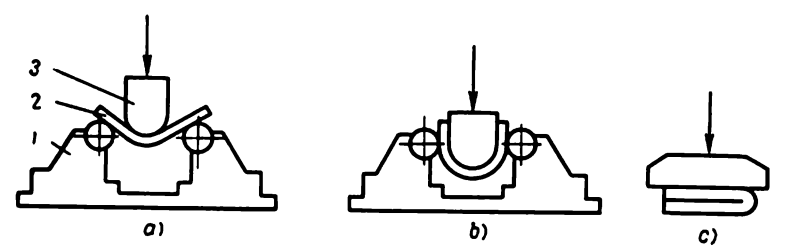


Fig. 14. Schéma d'essais technologiques des métaux : *1* — bâti support ; *2* — éprouvette ; *3* — mandrin

ou bien on le courbe autour d'un mandrin ayant une épaisseur donnée (fig. 14,*b*). S'il s'agit d'un acier doux, on le replie sur 180° (fig. 14,*c*).

§ 6. CORROSION DES MÉTAUX FERREUX; PROTECTION CONTRE LA CORROSION

a) Corrosion des métaux

L'action réciproque qui se produit entre un métal et le milieu ambiant peut détruire ce métal. C'est ce qu'on appelle la c o r r o s i o n. La corrosion est le résultat de phénomènes chimiques ou électrochimiques, ainsi que des effets des courants vagabonds des câbles souterrains ou des voies ferrées.

La c o r r o s i o n c h i m i q u e apparaît quand le métal subit l'action de gaz secs et de solutions non électrolytiques (huiles, essences, pétrole, etc.). L'oxydation d'un métal à des températures élevées est un exemple de corrosion chimique. Les battitures formées sont un produit de la corrosion.

La c o r r o s i o n é l e c t r o c h i m i q u e résulte de l'action de solutions électrolytiques sur un métal : le métal cède ses ions à l'électrolyte, ce qui le détruit progressivement.

La corrosion peut également être le résultat du contact de deux métaux différents ou d'une hétérogénéité chimique dans un métal. Chaque métal possède des caractéristiques électriques bien déterminées, qui sont exprimées par diverses tensions. De deux métaux en contact, celui qui se détruit progressivement est le métal qui se trouve placé le plus bas dans la série des tensions électrochimiques. Par exemple, le fer se trouve plus haut que le chrome et le zinc, mais plus bas que le cuivre et l'argent dans cette série. Si le fer est en contact avec du chrome ou du zinc, c'est donc ces derniers qui seront détruits, tandis que dans un contact entre fer et cuivre ou argent, c'est le fer qui sera détruit. La rapidité de cette destruction dépend de la température, la nature et la concentration de l'électrolyte. Les acides et les alcalis qui dissolvent le fer ont des effets nuisibles sur ce métal. Le gaz carbonique et le gaz sulfureux de l'air intensifient la corrosion parce qu'ils forment sur la surface d'un métal humide des acides qui réagissent avec le métal.

La corrosion peut être :

locale, si le métal est détruit seulement dans certaines régions ;

uniforme, si le métal est détruit uniformément sur toute sa surface ;

intercristalline, si la destruction du métal se produit non pas comme habituellement à partir de la surface, mais à l'intérieur du métal, aux frontières des grains.

b) Protection des métaux contre la corrosion

Il existe plusieurs procédés de protection des métaux contre la corrosion. Le plus simple consiste à recouvrir le métal de divers émaux, laques ou peintures. La pellicule ainsi formée sur le métal protège celui-ci contre l'action du milieu ambiant (gaz ou humidité).

On utilise également d'autres méthodes, qui sont plus parfaites et ont des effets plus durables :

a l l i a g e : cette méthode consiste à allier le métal avec certains éléments qui augmentent sa résistance à la corrosion ;

o x y d a t i o n a r t i f i c i e l l e : obtention d'une couche superficielle et protectrice d'oxyde sur les pièces à protéger ;

revêtement métallique (placage) : ce procédé consiste à recouvrir un métal par une fine pellicule d'un autre métal résistant mieux à la corrosion dans des conditions déterminées (zinc, étain, aluminium). On réalise ces placages métalliques en déposant le métal protecteur sur la surface à protéger à partir d'une solution (revêtement galvanique), ou en pulvérisant ou bien en immergeant la pièce dans un bain de métal protecteur.

§ 7. FABRICATION DES PIÈCES FINIES MÉTALLIQUES

Pour fabriquer diverses pièces métalliques, le métal fondu est déversé du four dans des récipients spéciaux qu'on appelle *lingotières*. Le métal solidifié, sous forme de lingots de 500 kg à plusieurs tonnes (parfois plusieurs dizaines de tonnes), est usiné au résultat de quoi on obtient des pièces ayant les formes, les dimensions et surtout les propriétés que l'on désire.

On distingue plusieurs procédés d'usinage des métaux : par pression à l'état chaud, par pression à l'état froid et par coulée.

Pour les constructions métalliques on utilise divers procédés d'assemblage de leurs éléments. Ces assemblages se répartissent en deux groupes : assemblages démontables (par boulons, clavettes, coins) et non démontables (par rivetage et soudage). Les plus économiques sont les assemblages soudés, qui permettent d'intensifier la mécanisation des travaux de construction et, de plus, réduisent la consommation de métal et le prix de la construction.

a) Fonderie

Les opérations de fonderie donnent des pièces ayant la forme et les dimensions du moule, fait avec divers matériaux spéciaux : terre, sable quartzeux concassé, plâtre, métal, matières réfractaires. On réalise les moules à l'aide de modèles rigoureusement conformes aux dimensions et à la configuration de la pièce que l'on désire obtenir.

Pour les constructions, les pièces sont coulées principalement en fonte. Il s'agit surtout des parties d'appui des piliers, de radiateurs de chauffage, de tuyaux, de pièces décoratives, etc.

b) Usinage des métaux sous pression

On emploie actuellement les méthodes principales suivantes pour usiner les métaux par pression : laminage, forgeage, étirage, étampage. Toutes ces méthodes reposent sur la plasticité élevée du métal.

L a m i n a g e. Le laminage est la méthode la plus économique et la plus répandue pour fabriquer les pièces métalliques. Il consiste en principe à comprimer le métal entre des cylindres rotatifs. Ce passage entre les cylindres a pour effet de réduire la section et d'allonger l'ébauche.

On peut laminer un métal à froid ou à chaud. Le laminage à froid est employé pour les métaux très plastiques (plomb et étain) et les tôles d'acier extrêmement minces (car elles se refroidissent très rapidement). La plupart des pièces en acier sont laminées à chaud entre 900 et 1 250 °C. On obtient la forme et les dimensions désirées en plusieurs passes successives du lingot dans des séries de cylindres dont les jeux vont en diminuant.

Le laminage permet de fabriquer la plupart des pièces en acier employées dans la construction : poutres, rails, tôles, barres, fers d'armature, tuyaux.

F o r g e a g e. Le forgeage est l'opération qui consiste à déformer un métal incandescent sous l'effet de chocs répétés d'un marteau.

Dans le forgeage *libre*, le métal peut s'étirer et se déformer dans toutes les directions sous les coups de marteau. Dans le forgeage à l'é t a m p e, c'est-à-dire dans l'étampage, le métal s'étire sous les coups de marteau, et remplit la forme ou matrice ; l'excédent de métal sort dans une gorge spéciale où il est sectionné. L'étampage permet d'obtenir des pièces ayant des dimensions très exactes.

Pour les constructions on emploie principalement le forgeage libre dans le but de fabriquer diverses pièces (boulons, étriers, pièces d'ancrage), percer des trous et sectionner le métal. Le rivetage est également une opération de forgeage. Le forgeage se fait actuellement avec des marteaux mécaniques appelés marteaux-pilons. Dans certains cas, on pratique également le forgeage manuel.

E t i r a g e. C'est une opération qui consiste à étirer une ébauche métallique à travers un trou de section inférieure à celle de l'ébauche. L'étirage a pour effet de comprimer le métal et de lui donner une section rigoureusement

identique à celle du trou de la matrice. Les ébauches sont des barres ou des tuyaux préalablement laminés ou pressés.

D'habitude, l'étirage d'un métal se fait à froid. On obtient ainsi des pièces de sections très précises et à surface nette et lisse.

L'étirage permet d'obtenir des pièces à parois minces (tuyaux) ainsi que des barres de petite section (jusqu'à 10 mm^2) circulaire, carrée ou hexagonale.

L'étirage produit dans un métal ce qu'on appelle l'é c r o u i s s a g e. L'écrouissage est une sorte de renforcement du métal dû à des déformations plastiques. Il augmente la dureté de l'acier mais réduit sa plasticité et sa résilience.

L'écrouissage provoque le v i e i l l i s s e m e n t de l'acier ; le dernier subit des modifications de structure ayant pour effet d'augmenter sa fragilité. Le vieillissement de l'acier est particulièrement dangereux dans les constructions soumises aux chocs (dans les ponts de voies ferrées, rails, poutres d'appui, ponts roulants, etc.). Néanmoins, on utilise beaucoup l'écrouissage dans la pratique pour renforcer mécaniquement les fers d'armature, augmenter leur limite d'élasticité et économiser le métal d'armature.

c) Soudage des pièces métalliques

On divise les méthodes de soudage en deux groupes principaux : le soudage par simple compression et le soudage par fusion.

Dans le soudage par simple compression, on réchauffe les bords du métal jusqu'à l'état plastique ou liquide, après quoi on les assemble par compression. Le soudage par fusion consiste en principe à faire fondre les bords des pièces assemblées puis à refroidir le métal fondu dans la région du joint.

Le soudage par simple compression comprend le soudage à la forge, le soudage électrique et le soudage par résistance. Ce dernier repose sur l'effet thermique produit par le courant qui traverse les pièces à souder (par exemple, dans le soudage par points et le soudage en bout des armatures).

Au soudage par fusion se rapportent le soudage à l'arc électrique, qui repose sur l'emploi de la chaleur produite par un arc électrique ; le soudage au gaz, dans lequel on met en contact les bords de la pièce fondus par un gaz

combustible ; le soudage à l'arc en atmosphère gazeuse, qui utilise la chaleur de l'arc électrique sous un gaz de protection ; le soudage aluminothermique, dans lequel le métal est chauffé à la thermite (soudage des rails par exemple).

Pour assembler les éléments de constructions en acier on utilise de préférence le soudage à l'arc électrique, et plus rarement le soudage au gaz et à la thermite. En principe, les armatures des constructions en béton armé sont soudées par résistance (voir chapitre VII).

S o u d a g e à l'a r c é l e c t r i q u e. Dans le soudage à l'arc, le métal des pièces que l'on veut joindre est chauffé jusqu'à l'état liquide au moyen de la chaleur produite par l'arc électrique lorsque le courant passe entre une électrode et les pièces. La température peut atteindre 6 000 °C dans la région de l'arc, ce qui assure le chauffage concentré et rapide du métal jusqu'à sa fusion, au résultat de quoi les deux pièces se soudent. Le soudage à l'arc utilise aussi bien le courant continu que le courant alternatif.

Le soudage à l'arc, découvert par l'ingénieur N. Bénardos en 1882, qui utilisait dans ce but une électrode en charbon, a été plus tard perfectionné par l'ingénieur N. Slavianov, en 1888. Ce dernier a remplacé l'électrode en charbon par des électrodes métalliques. Le procédé de Slavianov s'est rapidement répandu; il consiste en ce qui suit.

L'un des conducteurs qui arrive de la source de courant est connecté à la pièce à souder et l'autre est connecté à l'électrode, qui est une mince tige métallique. Lorsqu'on ferme le circuit, un arc électrique se forme entre les extrémités de l'électrode et la pièce faisant fondre les bords de la pièce et l'électrode. Le métal de l'électrode remplit l'écartement compris entre les deux pièces et forme une soudure après solidification.

La solidité d'un joint dépend de la profondeur de pénétration, c'est-à-dire de la profondeur à laquelle le métal d'apport de l'électrode s'allie avec le métal des pièces. Cette solidité dépend également de l'électrode employée.

L'électrode est une mince baguette en acier de 2 à 12 mm de diamètre, recouverte d'un enduit spécial (enrobage). Les enrobages, dans la composition desquels peuvent entrer la potasse, la soude, la chaux, l'amidon, etc., sont appliqués sur l'électrode à l'état liquide. Pour établir une liaison efficace de l'enrobage avec l'électrode, on le dissout dans du verre liquide.

L'enrobage augmente la stabilité de la combustion de l'arc et crée une enveloppe gazeuse qui protège le métal fondu contre l'action de l'air. En outre, l'enrobage forme un laitier qui protège la soudure contre l'oxydation, améliorant finalement la qualité du joint soudé.

Dans le soudage manuel à l'arc électrique on emploie des électrodes de type et de composition variables suivant la nature de l'acier à souder : électrodes Э-34, Э-38 et Э-42A, pour les aciers à carbone ordinaires et les aciers de ponts, électrodes Э-50A et Э-55A pour les aciers alliés à faible alliage [les chiffres désignent la charge de rupture (en kg/cm^2) du joint soudé avec le type d'électrode donné].

Pour fabriquer les électrodes on emploie des fils d'acier à souder à bas carbone.

S o u d a g e a u g a z. Le soudage au gaz consiste à faire fondre le métal dans la région du joint grâce à la chaleur obtenue par la combustion d'un gaz ou d'un combustible liquide. On ajoute supplémentairement dans le chanfrein le métal d'apport obtenu par la fusion d'une mince baguette métallique. Le métal composant celle-ci est analogue au métal des pièces que l'on assemble. On emploie le soudage au gaz pour effectuer la jonction de minces pièces en acier au carbone et en acier allié, en fonte grise et en métaux non ferreux. Ce procédé est peu appliqué dans les constructions parce qu'il est onéreux comparativement au soudage à l'arc.

Le procédé de soudage aux gaz le plus économique est le soudage oxyacétylénique. L'acétylène et l'oxygène sont livrés séparément sous pression dans des bouteilles spéciales. Par l'intermédiaire de boyaux les gaz sont amenés pendant le soudage vers un chalumeau où ils se mélangent. A la sortie de la buse du chalumeau on les allume. La flamme, dont la température atteint environ 3 000 °C agit sur la région de la soudure où l'on introduit le métal d'apport qui est un fil en acier. Les bords des pièces et le métal d'apport fondent sous l'action de la chaleur. La région de l'aboutement se remplit de métal et l'on obtient ainsi un joint soudé.

Contrôle de la qualité des soudures. On contrôle la qualité des soudures par examen extérieur, recherches métallographiques, essais mécaniques, radiographie, etc.

L'e x a m e n e x t é r i e u r permet de déceler les défauts superficiels des soudures, de vérifier les dimensions, la forme et la compacité du joint. La compacité est particu-

lièrement importante quand il s'agit de réservoirs divers et de tuyauteries de gaz et d'eau.

Les recherches métallographiques se font par macrographie et micrographie. Pour faire ces recherches, on découpe dans le plan de la soudure des échantillons auxquels on fait ensuite subir des essais mécaniques. La micrographie permet de déterminer la profondeur de pénétration et de déceler les porosités, les pailles et les fissures dans une soudure.

On effectue les essais mécaniques sur des échantillons découpés dans les éléments de construction On se contente parfois d'essayer des échantillons découpés dans des plaques ou des tôles soudées spécialement dans ce but. On essaie les échantillons à la traction, à la flexion, aux chocs, etc.; ces essais sont exécutés comme il est décrit ci-dessus dans le chapitre concernant les propriétés mécaniques des métaux.

La radiographie par rayons X permet de déceler les défauts d'une soudure sans détruire le joint soudé, ce qui est un avantage considérable de cette méthode.

Cet examen des soudures peut se faire ou directement par radiographie ou sur des pellicules radiographiées. L'étude radiographique permet de déceler les fissures, soufflures, défauts de pénétration, etc., dans un joint soudé.

§ 8. MÉTAUX FERREUX ET PIÈCES MÉTALLIQUES EMPLOYÉS DANS LES CONSTRUCTIONS

a) Aciers de construction et leur emploi

Types d'aciers. Les éléments de construction en acier subissent des efforts très divers : les poutres travaillent à la flexion, les piliers à la compression, les armatures en béton armé et certaines parties des fermes travaillent à la traction, les voies des ponts roulants et les voies ferrées travaillent aux chocs, etc. La fabrication d'un acier qui résisterait pareillement à tous les genres d'efforts est difficile et entraînerait de grosses dépenses. C'est pourquoi l'industrie métallurgique produit divers aciers, qui diffèrent entre eux par leurs qualités et leurs destinations. Les plus répandus ont les marques suivantes :

aciers au carbone ordinaires : Cт. 0, Cт. 1, Cт. 2, Cт. 3, Cт. 4, Cт. 5 ;

aciers au carbone laminés à chaud, pour la construction de ponts : M16C et Ст. 3 (acier pour ponts) ;

aciers au carbone laminés à chaud, pour la fabrication de rivets : Ст. 2, Ст. 3 ;

aciers à faible alliage : НЛ1, НЛ2 ;

aciers pour rails : M-71, НБ-62, M-75.

Les conditions imposées à ces aciers sont indiquées dans le tableau 4.

Tableau 4

Caractéristiques mécaniques imposées aux aciers de construction

Marque d'acier	Charge de rupture à la traction (kg/cm²), minimum	Limite de fluage (kg/cm²), minimum	Allongement relatif (%), minimum
Ст. 0	3 200	—	18—22
Ст. 1	3 200	—	28—33
Ст. 2	3 400	1 900	26—31
Ст. 3	3 800	2 100	21—27
Ст. 4	4 200	2 400	19—25
Ст. 5	5 000	2 600	15—20
M16C	3 800	2 300	22—28
Ст. 3 pour ponts	3 800	2 400	22—28
НЛ 1	4 200	3 000	20
НЛ 2	4 800	3 400	18
M-71 et M-75	8 000	—	—
НБ-62	7 500	—	—

Ce tableau montre que, au fur et à mesure que le numéro de la marque d'acier augmente de 0 à 5, la charge de rupture et la limite de fluage augmentent, tandis que l'allongement relatif diminue, c'est-à-dire que la fragilité de l'acier augmente. Cela tient à ce que la composition chimique de l'acier varie et la proportion de carbone augmente. C'est ainsi que l'acier Ст. 2 contient 0,15% de carbone, tandis que l'acier Ст. 5 en contient jusqu'à 0,37%.

Les aciers НЛ1 et НЛ2 sont des aciers à faible alliage. Ils contiennent des additions de chrome, de nickel et de cuivre qui leur donnent des caractéristiques mécaniques élevées et, de plus, augmentent leur résistance à la corrosion.

Les propriétés d'un acier déterminent ses applications.

A c i e r Cт. 3. Cet acier est le plus largement employé dans les constructions. Il est plastique, se soude bien et possède une limite de fluage élevée. On emploie l'acier Cт. 3 dans les constructions métalliques de bâtiments et ouvrages industriels, pour les pièces de forgeage importantes et pour les armatures en béton armé. Il est défendu d'employer cet acier pour la fabrication des poutres soudées de ponts roulants dans des bâtiments industriels à conditions d'exploitation sévères, ni dans les constructions portantes en tuyaux.

A c i e r Cт. 0. Comme cet acier possède une qualité relativement faible, il faut l'employer pour les constructions métalliques de bâtiments ayant moins d'importance, ainsi que pour la fabrication des armatures.

A c i e r Cт. 2. Cet acier possède des qualités plastiques élevées. On l'emploie pour les constructions importantes en tôle des gazomètres, réservoirs, tuyauteries, pour les constructions tubulaires portantes et les armatures en béton armé.

A c i e r Cт. 4. On peut employer cet acier dans les mêmes conditions que l'acier Cт. 3.

A c i e r Cт. 5. On emploie cet acier dans les mêmes conditions que l'acier Cт. 3, ainsi que pour la fabrication des rails à section rectangulaire de ponts roulants.

A c i e r M16C. Acier possédant une haute résilience. On l'emploie pour la fabrication des poutres soudées de ponts roulants et des travées de ponts.

A c i e r s HЛ1 et HЛ2. On emploie ces aciers dans les mêmes conditions que l'acier Cт. 3, mais dans des ouvrages plus importants. On en fabrique des travées des ponts (HЛ2) et des constructions en tôle (HЛ1).

A c i e r s M-71, HБ-62 et M-75. Ces aciers sont employés pour la fabrication de rails à large voie.

b) Aciers profilés

En U.R.S.S. on fabrique des aciers laminés de divers profils : à sections circulaires, carrées, angulaires, en double T, en U, fers plats, tôles et tubes.

Profilés laminés. On fabrique les aciers e n b a n d e s d'une largeur de 12 à 200 mm et d'une épaisseur de 4 à 60 mm, ainsi qu'un autre type d'acier laminé en bandes pouvant avoir une largeur de 1 500 et une épaisseur de 50 mm.

L'acier en tôles ou feuilles est fabriqué soit sous forme de tôles épaisses (épaisseur de 4 à 60 mm, largeur de 600 mm à 3 m), soit de tôles minces (épaisseur de 0,9 à 3,75 mm, largeur de 600 à 1 400 mm).

L'acier en feuilles minces comprend les tôles ordinaires et les tôles galvanisées (zinguées) qui ont une épaisseur

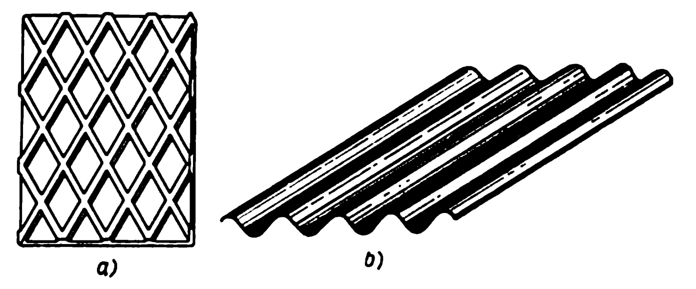


Fig. 15. Tôle d'acier :
a — gaufrée ; b — ondulée

de 0,38 à 0,82 mm et des dimensions de 710 × 1 420 mm et de 1 000 × 2 000 mm.

Les tôles en acier sont livrées soit gaufrées (fig. 15,*a*) soit ondulées (fig. 15,*b*).

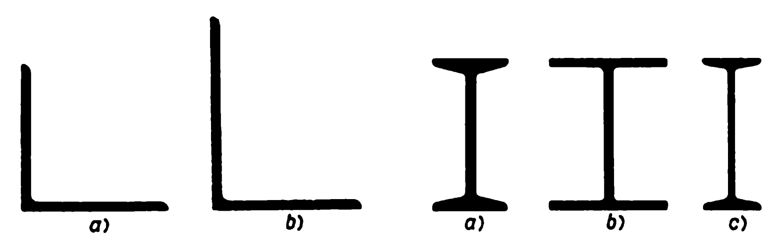


Fig. 16. Cornières d'acier :
a — à ailes égales ; b — à ailes inégales

Fig. 17. Profilés en double T :
a — ordinaire ; b — à ailes larges ; c — allégé (à ailes étroites)

Fers ronds et fers carrés. Les fers à section carrée ont de 6 à 200 mm de côté. Les fers ronds ont un diamètre de 5 à 200 mm.

Les cornières en acier (fig. 16) ont des ailes égales (*a*) ou inégales (*b*) ; les premières ont des ailes d'une largeur variant de 20 à 230 mm, et les cornières à ailes inégales peuvent varier de 30 × 20 jusqu'à 200 × 150 mm.

Les *poutres en double T* (fig. 17) peuvent avoir un profil ordinaire (*a*), des ailes larges (*b*) ou des ailes étroites (*c*). La hauteur des poutres à profil ordinaire est de 100 à 600 mm, celle des poutres à ailes larges de 200 à 1 000 mm, et celle des poutres à ailes étroites de 160 à 300 mm. Les poutres à ailes larges et les poutres à ailes étroites sont plus légères que les poutres à profil ordinaire pour une même capacité de charge, ce qui donne une économie très importante de métal.

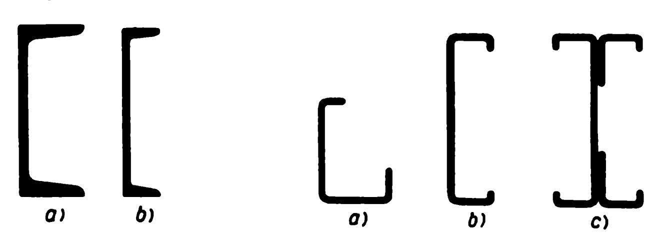


Fig. 18. Profilés en U :
a — ordinaire ; *b* — allégé

Fig. 19. Profilés emboutis :
a — cornières ; *b* — en U ;
c — assemblés en double T

Les *poutres en U* (fig. 18) sont, pareillement aux poutres en double T, fabriquées avec un profil ordinaire (*a*) d'une hauteur de 50 à 400 mm ou bien de forme allégée (*b*) d'une hauteur de 160 à 200 mm.

Les *tuyaux en acier* peuvent être fabriqués sans soudure (diamètre de 5 à 430 mm) ou soudés (diamètre pouvant atteindre 1 400 mm).

Profilés obtenus par emboutissage. Les profilés en acier les plus parfaits sont les profilés emboutis : cornières, poutres en U et en double T (fig. 19).

Les cornières et les poutres en U obtenues par emboutissage (fig. 19, *a* et *b*) sont fabriquées avec un acier élastique et mince en larges bandes dont l'épaisseur varie de 1,5 à 5 mm. Le métal employé pour leur fabrication est l'acier ordinaire de construction Cт.3.

Les poutres embouties en double T sont fabriquées par juxtaposition de deux profilés en U, ou bien d'une poutre en U et de deux cornières (fig. 19, *c*) avec autosoudage ultérieur des éléments de l'ensemble.

Les profilés emboutis peuvent être employés avec succès en qualité de poutres, de piliers comprimés ou de barres

dans des constructions. L'emploi de ces profilés permet d'économiser 15 à 20% de métal comparativement aux profilés ordinaires.

Armatures des constructions en béton armé. Ces armatures entrent dans les catégories suivantes :

profilés périodiques laminés à chaud en acier Cт.5, 32Г2С et 30ХГ2С, renforcés ou non renforcés (fig. 20, *a*) :

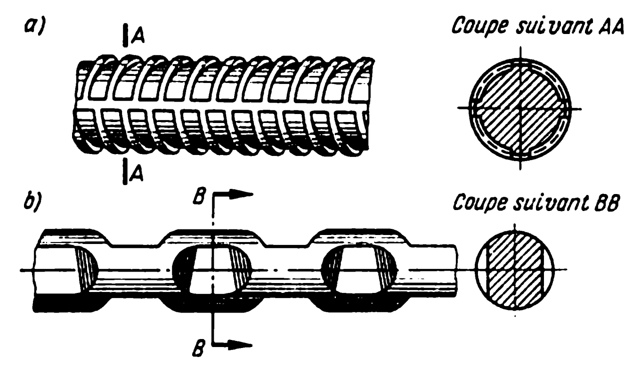


Fig. 20. Aciers d'armature en béton armé :
a — profil périodique, laminé à chaud ; *b* — laminé à froid

profilés périodiques laminés à froid, en acier Cт.3 et Cт.0 (fig. 20, *b*) ;

fers laminés à chaud plats, ronds ou profilés en acier Cт.3 et Cт.0, renforcés ou non renforcés ;

fils d'acier au carbone d'un diamètre de 2,5 à 8 mm pour constructions à précontrainte.

Le tableau 5 indique les caractéristiques mécaniques de l'acier d'armatures.

Ce tableau montre que l'acier laminé à chaud a une résistance mécanique plusieurs fois plus faible que l'acier laminé à froid. A titre d'exemple, la charge de rupture de l'un des meilleurs aciers pour barres (32Г2С) est de 6 000 kg/cm^2, tandis que celle d'un fil d'acier laminé à froid de 8 mm de diamètre est de 14 000 kg/cm^2. Mais la difficulté de fabrication d'un fil d'acier laminé à froid augmente considérablement avec le diamètre. En outre, l'emploi de fils de faible diamètre au lieu de tiges d'armature exige des travaux d'armaturage beaucoup plus importants. En effet, si l'on veut conserver la surface totale nécessaire des fers

Tableau 5

Nomenclature et caractéristiques des aciers d'armature

Dénomination	Diamètre de l'armature (mm)	Minima de rebut (kg/cm²)		Allongement relatif de rupture (%), minimum
		Limite d'élasticité	Charge de rupture	
I. Aciers ronds				
Acier Cт. 3	6—40	2400	3800	25
— Cт. 0	6—40	1900	3200	22
— Cт. 3 renforcé par traction jusqu'à 2800 kg/cm²	6—22	2800	3800	10
Acier Cт. 0 renforcé par traction jusqu'à 2400 kg/cm²	6—22	2400	3200	10
II. Aciers à profil périodique				
Acier Cт. 5	10—40	2800	5000	19
— Cт. 5 renforcé par traction jusqu'à 4500 kg/cm²	10—40	4500	4000	8
Acier 32Г2C	6—40	4000	6000	14
Acier 32Г2C renforcé par traction jusqu'à 5500 kg/cm²	6—40	5500	6000	6
Acier 30XГ2C	10—32	6000	9000	6
III. Fils d'acier				
Au carbone, rond, étiré à froid	2,5—8 *	—	20000—14000 **	2—4 **
A haute résistance, étiré à froid, à profil périodique	2,5—8	—	18000—12000	4—6

* Diamètres: 2; 3; 4; 5; 6; 7 et 8 mm.

** Le premier nombre correspond au diamètre de 2,5 mm et le deuxième à un diamètre de 8 mm.

dans le béton armé, il faut remplacer une tige par plusieurs fils.

Pour réduire le volume des travaux d'armaturage, on a commencé à utiliser des paquets de fils, des câbles qui se composent de plusieurs fils réunis en un seul tout. Ce genre d'armature a une importance essentielle en ce qui concerne la précontrainte des éléments préfabriqués de grandes dimensions (fermes et éléments des travées de ponts).

La limite de fluage est la caractéristique mécanique la plus importante d'une armature : la précontrainte que l'on peut admettre dans un élément de béton armé travaillant en flexion (traction), sans craindre de fissurations importantes dans la zone tendue, est d'autant plus grande que la limite de fluage est elle-même plus grande.

Si les tensions de traction dépassent la limite de fluage de l'acier, l'armature subit un allongement important, qui est transmis au béton par suite de l'adhérence énergique entre béton et armature. Le béton est un matériau fragile, il ne peut pas résister à un effort de traction comme l'acier. Pour cette raison, un allongement très élevé de l'armature provoque des fissures dans la zone tendue de l'élément en béton armé. Si l'on veut éviter la formation de fissures, il faut que pendant la flexion d'un élément en béton armé les tensions de l'acier ne dépassent pas la limite de fluage, bien que l'acier puisse supporter des tensions beaucoup plus élevées sans risque de rupture. Pour utiliser le mieux possible l'acier dans le béton armé et économiser cet acier, il faut qu'il possède une limite de fluage élevée ou il doit subir un renforcement mécanique par traitement spécial dans le but d'accroître cette limite de fluage.

On renforce une armature par étirage, par aplatissements de la section ou par calibrage dynamique des tiges d'acier rondes. L'étirage consiste à faire passer la tige à travers un trou conique. Comme le diamètre du trou de sortie est inférieur à celui de la tige étirée, cette dernière se trouve comprimée. L'opération dite aplatissement de l'acier consiste à faire passer les tiges rondes entre deux cylindres rotatifs. Lors du calibrage dynamique, on étire le fer d'armature avec un effort supérieur à la limite de fluage. Dans ces conditions, l'acier d'armature s'étire un peu et sa section diminue.

Le procédé le plus simple et le plus efficace pour renforcer mécaniquement l'acier d'armature consiste à aplatir

dans des machines spéciales les aciers ronds laminés à chaud. Cette opération donne simultanément deux résultats : elle accroît la limite de fluage et permet d'obtenir une armature à profil périodique qui assure un ancrage efficace de cette armature dans le béton.

L'opération fait accroître la limite de fluage de 40 à 50 %.

Le trait continu sur la figure 12 représente le diagramme de traction de l'acier avant le renforcement, et les pointillés celui de son allongement après le renforcement.

On peut économiser 20 à 25% d'acier dans le béton armé en utilisant une armature à profil périodique et à limite de fluage élevée.

c) Pièces en acier

Les r i v e t s sont employés pour assembler des pièces métalliques et peuvent avoir une tête ronde, noyée ou semi-noyée. On les fabrique en acier Ст.2, Ст.3 et НЛ1.

Les b o u l o n s et les é c r o u s servent à assembler des constructions métalliques démontables, fixer un revêtement en bois sur une carcasse métallique, etc. Les boulons peuvent être livrés à l'état usiné ou brut et avoir une tête carrée ou hexagonale. Les boulons usinés possèdent des dimensions plus précises. On fabrique les boulons et les écrous en acier Ст.3, Ст.5, НЛ1 et НЛ2. Leur diamètre varie de 6 à 36 mm.

Les c l o u s o r d i n a i r e s peuvent avoir une section carrée ou ronde et une longueur atteignant 250 mm. Les clous pour tôles, revêtements et tapisseries ont une longueur pouvant atteindre 40 à 50 mm. On fabrique les clous avec un fil en acier à bas carbone.

Les v i s à b o i s ont une tête à fente dans le but de permettre leur vissage à l'aide d'un tournevis. Ces vis peuvent avoir également une tête permettant le vissage à la clé. Leur longueur varie de 6 à 250 mm. On les emploie dans les assemblages en bois ou bien pour fixer sur du bois un revêtement en planches, en contre-plaqué, en carton de construction, etc.

C e r t a i n e s p i è c e s d e f o r g e en forme d'étriers servent à fixer des éléments en bois pour éviter leur décalage. Aux pièces de forge se rapportent également : les *goujons* qui servent à fixer des planches ou des poutres à l'extrémité d'un support, à des montants ou à des semelles

d'appui ; les *fiches* et *colliers* pour les assemblages sans pièces intermédiaires et travaillant à la flexion ; les *crochets* permettant de fixer des chéneaux aux murs et les *colliers* de fixation des tuyaux d'écoulement d'eau.

Pour préparer ces diverses pièces de forge, on emploie les aciers Ст.0 et Ст.3.

d) Pièces en fonte

Les pièces en fonte employées dans les constructions sont principalement en fonte grise, en fonte grise inoculée (à haute résistance). Les fontes grises se caractérisent par la présence de carbone libre et par la couleur grise de leur cassure.

On obtient les fontes grises inoculées en introduisant dans la fonte grise ordinaire des substances modificatrices spéciales, le ferrosilicium ou le calcium-silicium. Sous l'effet de ces substances, les grains de carbone libre (graphite) se désagrègent et ce dernier se répartit uniformément dans la fonte.

Les fontes inoculées, ou fontes à haute résistance, ont une plus grande résistance à la compression et à la traction que les fontes grises ordinaires. On les emploie pour couler certaines pièces importantes dans les constructions.

Les types de fontes grises ordinaires varient à partir de СЧ 12-28 jusqu'à СЧ 28-48. Les types de fontes grises inoculées varient de МСЧ 28-48 jusqu'à МСЧ 38-60. Dans ces désignations, le premier nombre indique la limite de résistance à la traction en kg/cm^2, et le deuxième, la limite de résistance à la flexion. La limite de résistance à la compression varie de 50 à 100 kg/mm^2 pour les fontes ordinaires et de 90 à 120 kg/mm^2 pour les fontes inoculées.

Pour les constructions portantes, on emploie les fontes dans la fabrication des pièces travaillant à la compression. La fonte grise est employée principalement pour fabriquer le matériel technique sanitaire (radiateurs, tuyaux) et les pièces d'art ou d'architecture.

Une grande quantité de fonte va à la construction des tunnels, par exemple des tunnels du métropolitain. La figure 21 représente certaines pièces principales en fonte les plus employées dans la construction.

Depuis quelques années, on commence à employer la fonte pour fabriquer de minces tôles de toitures, obtenues

directement de la fonte fondue subissant ensuite un traitement thermique qui réduit leur fragilité. Ces tôles sont à bon marché et, de plus, résistent bien à la corrosion en comparaison avec l'acier. Ce dernier avantage réduit les dépenses d'entretien des édifices et accroît la durée des couvertures de toits.

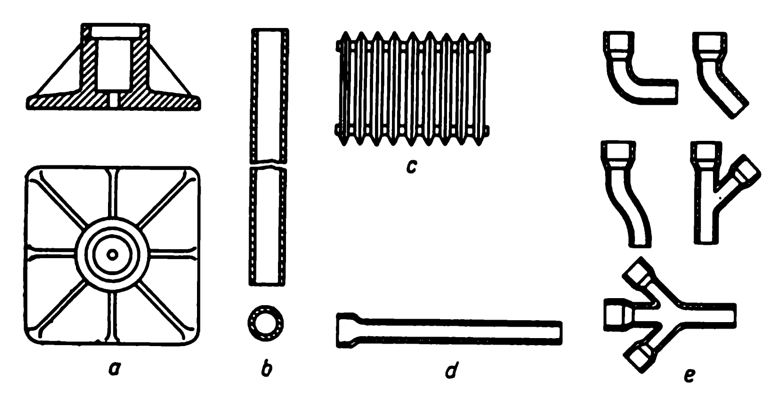


Fig. 21. Pièces de construction en fonte :
a — semelles (pour piliers); *b* — piliers montants; *c* — radiateurs ; *d* — tuyaux ; *e* — raccords de tuyaux

§ 9. ALLIAGES D'ALUMINIUM

L'acier qui possède des caractéristiques physiques et mécaniques élevées présente, par contre, un inconvénient essentiel : sa densité est élevée (7 850 kg/m^3) et de plus, il se corrode fortement.

Les alliages à base d'aluminium sont plus parfaits à ce point de vue. Leur densité est presque de trois fois moins grande que celle de l'acier; ils ne se corrodent presque pas dans les conditions atmosphériques et ils possèdent des qualités décoratives remarquables. En outre, la résistance mécanique des alliages d'aluminium n'est pas inférieure à celle de l'acier de construction de qualité supérieure, Ст. 5. A titre d'exemple, la charge de rupture de l'acier Ст. 5 est de 5 000 kg/cm^2 environ, tandis que celle des alliages d'aluminium à haute résistance atteint 6 500 kg/cm^2.

Production des alliages d'aluminium. L'aluminium métallique est l'élément essentiel des alliages d'aluminium.

On obtient l'aluminium métallique en deux étapes. Tout d'abord, à partir du minerai d'aluminium est obtenue, par un procédé chimique ou thermique, l'alumine ou oxyde d'aluminium Al_2O_3 qui, ensuite, nous donne l'aluminium métallique Al par électrolyse de cette alumine.

La matière première principale de l'industrie de l'aluminium est la bauxite, qui est un mélange d'oxyde d'aluminium hydraté $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ et de matériaux inertes. La proportion d'alumine dans les bauxites naturelles est de 50 à 60% en moyenne.

On emploie également des minerais moins riches en alumine que les bauxites pour fabriquer l'aluminium : l'alunite, qui est un sulfate d'aluminium et de potassium ; les minerais néphéliniques qui sont un silicate basique d'aluminium, et autres minerais y compris les argiles et les kaolins.

Propriétés et emplois de l'aluminium et de ses alliages. L'aluminium de pureté industrielle a un poids spécifique de 2,7 kg/cm³. Il fond aux environs de 660°C et possède une conductibilité très élevée, qui n'est inférieure qu'à celle de l'argent et du cuivre. L'aluminium a également une grande résistance à la corrosion. Il se forme sur sa surface une pellicule mince mais très adhérente d'oxyde qui protège le métal contre la corrosion. L'aluminium n'est attaqué énergiquement que par l'acide sulfurique et les alcalis.

Grâce à l'ensemble de ces excellentes qualités techniques l'aluminium est très employé dans l'industrie (aviation, constructions de machines, industries chimiques). Depuis quelques années, on commence à employer également l'aluminium dans les pièces de construction et les charpentes. Avec les pièces laminées on fabrique des fermes, des poutrelles, des tuyaux, etc.

Les inconvénients essentiels de l'aluminium pur (ne contenant aucune impureté ou addition métallique) sont, d'une part, sa faible résistance à la rupture (de 700 à 900 kg/cm²) et, d'autre part, sa faible dureté (H_B = 15 kg/mm²). Ces deux défauts ont retardé le développement de l'industrie de l'aluminium. Mais on a découvert au début de ce siècle une précieuse propriété de l'aluminium qui consiste à augmenter considérablement sa résistance mécanique en lui ajoutant d'autres métaux, tels que le magnésium, le cuivre, le silicium, le zinc et le nickel. En combinant qualitati-

vement et quantitativement ces divers métaux (de 1,5 à 20%), on obtient des alliages d'aluminium qui ont les propriétés physiques, chimiques, mécaniques et technologiques que l'on désire.

Les alliages d'aluminium se divisent en deux groupes : alliages de moulage et alliages usinés sous pression.

Les alliages de moulage sont employés pour fabriquer les pièces moulées. Ils comprennent les alliages suivants: le *silumin*, alliage d'aluminium et de silicium (10 à 14%) ; le *magnal*, alliage d'aluminium et de magnésium (8 à 12%) ; les alliages d'aluminium et de cuivre (7 à 12%) ; l'*aluminium* dit *secondaire*, qui est un alliage d'aluminium et de quatre autres métaux : silicium (3 à 7%), cuivre (1 à 4%), manganèse (0,4 à 0,8%) et zinc (0,5 à 1,0%). Dans la construction, on emploie l'aluminium secondaire principalement pour la fabrication de pièces d'appui des charpentes en aluminium, de matériaux confortatifs et de pièces architecturales.

Les alliages usinés sous pression sont laminés à chaud et à froid dans le but d'obtenir des dalles, des tôles, des bandes, des rubans avec lesquels on fabrique par pressage à chaud des profilés, des tuyaux et des barres qui sont ensuite étirés à froid. A ces alliages se rapportent en particulier :

l'*altmag*, alliage d'aluminium et de magnésium (2,8%) ;

l'*avial*, alliage d'aluminium et de cuivre (moins de 2,6%), de magnésium (0,8%), de silicium (1,2%) et de manganèse (moins de 0,8%) ;

le *duralumin*, alliage d'aluminium et de cuivre (moins de 5,5%), de magnésium (moins de 0,8%), de silicium (0,8%) et de manganèse (moins de 0,8%) ;

le *super-duralumin*, alliage d'aluminium et de cuivre (5,5%), de magnésium (0,8%), de silicium (moins de 1,25%) et de manganèse (0,6%) ;

l'alliage à haute résistance d'aluminium avec du zinc, du magnésium, du silicium et du manganèse.

Bien que les alliages d'aluminium usinés sous pression contiennent moins de métaux d'alliage que ceux de moulage, ils ont néanmoins une résistance mécanique plus élevée. Ils sont plus plastiques et peuvent être renforcés par traitement thermique et martelage. A titre d'exemple, après un martelage, c'est-à-dire après avoir été usinés sous pression, la résistance mécanique du duralumin peut passer de 4 000-4 800 kg/cm^2 à 5 500-6 000 kg/cm^2.

Les alliages d'aluminium les plus employés dans les constructions sont les suivants :

l'altmag (σ pouvant atteindre 3 000 kg/cm²), pour fabriquer les pièces à résistance mécanique moyenne et les rivets de revêtement ;

l'avial (σ pouvant atteindre 4 000 kg/cm²), pour les pièces de forme complexe à forger et à emboutir, et les tuyaux ;

le duralumin (σ pouvant atteindre 4 800 kg/cm²) pour fabriquer les profilés, tuyaux et barres.

Pour les pièces fortement chargées, on emploie le superduralumin (σ maximum 5 000 kg/cm²) et un alliage d'aluminium à haute résistance dont la résistance à la traction peut atteindre 6 500 kg/cm² et la dureté H_B 170 kg/cm² comme il a été déjà dit.

CHAPITRE III

PIERRES NATURELLES

On désigne sous le nom de roche une masse minérale constituée soit par un seul minéral (minéraux simples) soit par plusieurs minéraux.

Par leur composition chimique, les minéraux sont des combinaisons bien déterminées, ou bien des mélanges de ces combinaisons. On peut citer parmi les minéraux le quartz, l'orthoclase, la calcite, la dolomite, le gypse, etc.

Les minéraux utilisés comme pierres de construction naturelles ou comme matières premières pour production des matériaux de construction, sont désignés sous le nom de minéraux non métalliques.

L'étude de la structure et de la composition des minéraux et des roches est l'objet de la *pétrographie* et de la *minéralogie*, ainsi que d'une science nouvelle : la *géochimie*.

Les renseignements fournis par la géochimie permettent de déterminer dans une certaine mesure les gisements des différents minéraux utiles.

Les pierres naturelles sont largement mises en œuvre principalement pour les revêtements des façades des édifices importants, pour la maçonnerie et les revêtements d'ouvrages d'art divers, tels que les piles et culées de ponts, les barrages, quais, canaux, murs de soutènement. On les utilise également comme agrégats du béton (gravier et pierraille) pour faire des pavés, etc.

Les pierres poreuses légères (calcaire coquillier, tuf, etc.) sont essentiellement mises en œuvre sur place pour la maçonnerie sous forme de moellons ou de plaques de revêtement, ou encore pour l'aménagement des cloisons et des planchers. Après concassage, les calcaires coquilliers et les tufs servent d'agrégats dans les bétons légers.

On emploie les pierres pour la production des matériaux de construction, par exemple le ciment Portland (calcaires, argile, craie, marne), la chaux (calcaires), le plâtre (gypse naturel), les briques et pierres artificielles (argile, sable), etc.

Certains minéraux particulièrement légers (diatomite, terre d'infusoires, vermiculite, etc.) servent à fabriquer des matériaux calorifuges non organiques.

§ 1. CLASSIFICATION DES ROCHES

Nous adopterons ici la classification fondée sur les travaux de F. Lévinson-Lessing, A. Karpinsky et de quelques autres savants.

D'après les conditions de leur formation, les roches sont classées en trois catégories : roches volcaniques ou éruptives, roches secondaires ou sédimentaires et roches métamorphiques ou modifiées (fig. 22).

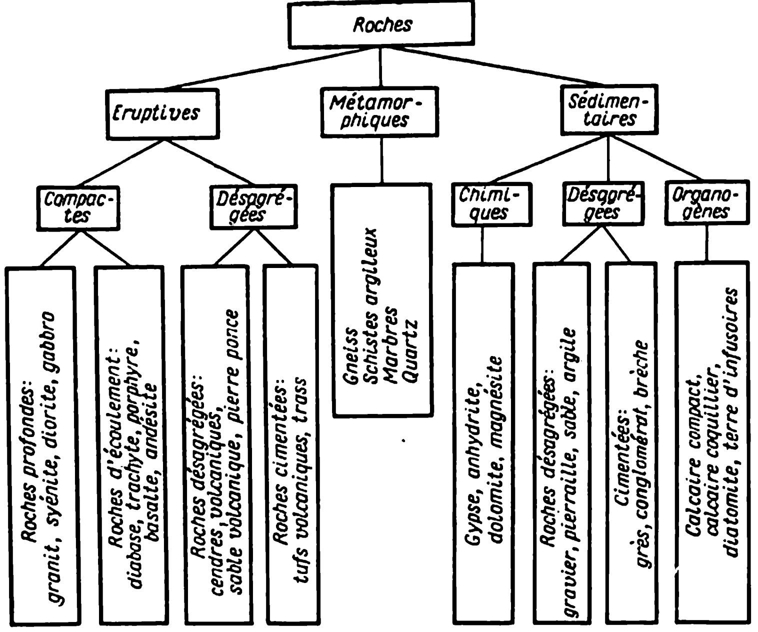


Fig. 22. Classification des roches utilisées dans la construction

Les r o c h e s é r u p t i v e s ou v o l c a n i q u e s, appelées également roches p r i m i t i v e s, sont le résul-

tat de la solidification de masses liquides au moment du refroidissement de l'écorce terrestre.

Les roches sédimentaires sont le résultat de désagrégation des roches volcaniques ou autres, sous l'influence des variations de température et l'action de l'eau et du vent. Les produits de désagrégation entraînés par l'eau à des distances considérables se sont déposés dans des régions plus calmes ou dans des bassins d'eau naturels (mers et lacs) sous forme de bancs. Ils ont été également transportés par le vent ou par des glaciers. Certains minéraux ainsi que les produits de leur désagrégation se sont dissous dans l'eau et ont formé ensuite des dépôts accumulés au fond des eaux. Enfin, les débris organiques et les fossiles se déposant dans les bassins d'eau ont également formé des roches sédimentaires.

Les roches métamorphiques ou roches modifiées résultent de modifications profondes (métamorphisme) intervenues dans les roches volcaniques ou sédimentaires sous l'action de températures ou pressions très élevées. Les phénomènes physiques et chimiques qui se produisent dans de telles conditions modifient la composition chimique et minéralogique des roches. Il se produit alors une recristallisation des minéraux et une transformation de leur structure, avec formation de nouvelles roches dont les propriétés diffèrent essentiellement de celles des roches initiales.

§ 2. CONSTITUANTS MINÉRAUX DES ROCHES

La majeure partie des minéraux se présente sous forme cristallisée. De nombreux minéraux sont *anisotropes*, ce qui signifie que certaines de leurs propriétés physiques (par exemple, conduction, dilatation linéaire sous l'effet de la chaleur, propriétés optiques) varient suivant la direction (axe) que l'on considère. A la différence des corps cristallisés, les corps amorphes (par exemple, la terre d'infusoires, les verres volcaniques) sont *isotropes*, c'est-à-dire que leurs propriétés physiques sont les mêmes quelle que soit la direction considérée.

Certains minéraux sont clivables, c'est-à-dire peuvent être assez facilement fracturés suivant une ou plusieurs directions. Les plans de cassure sont lisses et brillants. On les appelle plans de clivage.

Les minéraux diffèrent par leur composition chimique. Nous donnerons ci-après une description succincte des constituants minéraux les plus importants des roches.

a) Groupe du quartz

La substance la plus répandue dans l'écorce terrestre est l'anhydride silicique ou *silice libre* (SiO_2). Elle entre dans la composition de la plupart des minéraux sous forme de silicates, qui sont des combinaisons de la silice avec les principaux oxydes. La silice libre, ou silice naturelle, se rencontre sous forme de quartz, un des minéraux les plus répandus dans l'écorce terrestre.

Le quartz est de la silice cristallisée. Ses cristaux ont la forme de prismes hexagonaux se terminant par des pyramides à base hexagonale. Il est généralement opaque et possède fréquemment une nuance d'un blanc laiteux. Le quartz n'est pas clivable. Sa cassure est caverneuse et grasse. Le quartz ne se combine pas aux bases à la température ordinaire, et il n'est pas décomposé par les acides, à l'exception de l'acide fluorhydrique. Sa masse spécifique est de 2,65 et sa dureté 7. Il a une forte résistance à la compression (jusqu'à 20 000 kg/cm^2) et résiste également assez bien à l'abrasion et à l'érosion par le vent.

Chauffé jusqu'à 573 °C, le quartz passe par degrés de la forme béta à la forme alpha, son volume augmentant d'environ 1,5%.

Le quartz fond à 1 710 °C.

On rencontre également dans la nature l'opale, qui est un minéral amorphe constitué par de la silice hydratée ($SiO_2 \cdot nH_2O$).

La silice amorphe peut se combiner avec la chaux en présence d'eau à la température ordinaire. On dit alors qu'elle est active. Par contre, le cristal de roche, ou quartz, n'acquiert cette propriété que sous l'action de la vapeur sous forte pression (en autoclave), ou encore par fusion. On utilise ces propriétés dans la production des matériaux de construction. Le sable pur est presque entièrement constitué des grains de quartz cristallin.

b) Groupe des aluminosilicates

L'alumine Al_2O_3 occupe la deuxième place par son importance dans l'écorce terrestre, après la silice. On rencontre rarement l'alumine à l'état libre dans la nature.

Le corindon est l'un des minéraux naturels les plus durs. Il occupe en effet la neuvième place dans l'échelle des duretés. On l'emploie dans la production des matériaux très réfractaires. L'émeri est un corindon à grain fin contenant divers autres minéraux (par exemple, du quartz).

Dans la plupart des autres minéraux, l'alumine se trouve combinée avec de la silice et d'autres oxydes. Ces combinaisons sont appelées des aluminosilicates.

Les feldspaths sont les aluminosilicates les plus répandus dans l'écorce terrestre. Le groupe des aluminosilicates comprend également les micas, etc.

Les feldspaths. Tous les feldspaths sont essentiellement caractérisés par la présence très nette de deux plans de clivage. On les classe d'après l'angle existant entre ces deux plans (angle droit ou angle voisin d'un angle droit) : orthoclase ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), c'est-à-dire feldspath potassique, et *plagioclases*. Ce dernier groupe se subdivise en albite, qui est un feldspath sodique ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) et anortite, qui est un feldspath calcique ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot$ $\cdot 2SiO_2$).

Les micas sont des aluminosilicates hydratés de compositions diverses et d'ailleurs complexes. Ils sont caractérisés principalement par le fait qu'on peut facilement les fissurer en feuilles ou plaquettes minces et élastiques. Les micas les plus répandus sont : le mica potassique, ou mouskovite, qui est clair, transparent, chimiquement stable et réfractaire ; le mica ferromagnésien ou *biotite*, d'une composition instable, de couleur très foncée et qui se désagrège plus facilement que la mouskovite.

La kaolinite ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) est un aluminosilicate hydraté, résultant de l'érosion des roches volcaniques et métamorphiques. La kaolinite est la base de l'argile.

c) Groupe des silicates ferromagnésiens

Les matériaux de ce groupe ont une couleur foncée. Leur masse est plus élevée que celle des autres silicates. Leur dureté est comprise entre 5,5 et 7,5 à l'échelle des duretés. Ils sont extrêmement tenaces. Les roches qui contiennent ces minéraux dans une forte proportion ont une couleur foncée et une forte ténacité, et, par suite, résistent particulièrement bien aux chocs.

Les constituants des roches du groupe ferromagnésien les plus répandus sont :

les pyroxènes, dont les plus répandus sont les augites ;

les amphiboles qui comprennent en particulier les hornblendes ;

l'olivine, minéral de couleur verte, peu stable ; sous l'action des agents atmosphériques, l'olivine se modifie. Par combinaison avec de l'eau, elle se dilate et forme la serpentine.

L'amiante-chrysotile à texture fibreuse est une variante de la serpentine. L'amiante-chrysotile est constituée par des fibres fines et très résistantes. Elle trouve une large application dans l'industrie de l'amiante-ciment et des matériaux calorifuges.

d) Groupe des carbonates et sulfates

La calcite ou spath calcaire cristallin ($CaCO_3$) est un des minéraux les plus répandus dans l'écorce terrestre. La calcite est pratiquement insoluble dans l'eau. A l'état pur, elle est blanche et a une structure finement cristallisée.

La magnésite ($MgCO_3$) est un minéral dont la texture est pseudo-cristalline. Elle est plus lourde et plus dure que la calcite. A l'état pur, elle est blanche.

La dolomite ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) a des propriétés physiques voisines de celles de la calcite, mais elle est plus dure, plus résistante et moins soluble dans l'eau.

Le gypse, ou pierre à plâtre, ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) est d'origine sédimentaire. Sa structure est cristalline. Les cristaux de gypse prennent la forme de plaquettes, de bâtonnets, d'aiguilles ou de fibres. Le gypse est blanc, mais des impuretés peuvent lui donner diverses couleurs. Il se dissout relativement facilement dans l'eau.

L'anhydrite ($CaSO_4$) a un aspect analogue à celui du gypse. Elle est généralement d'un rouge blanchâtre ou d'une couleur bleuâtre. On la rencontre par couches et veines avec le gypse. Sous l'action de l'eau, l'anhydrite augmente de volume et se transforme progressivement en gypse.

§ 3. ROCHES ÉRUPTIVES

On classe les roches primitives ou éruptives en roches profondes et en roches d'écoulement.

Les roches profondes se sont formées par refroidissement du magma à une grande profondeur, à haute température et sous de fortes pressions. Ce refroidissement a été lent, et a ainsi produit des grains plus ou moins grands des divers minéraux. Ces grains adhèrent énergiquement les uns aux autres, sans intervention d'une substance d'agglomération, et peuvent être discernés à l'œil nu (fig. 23). Une roche profonde soumise à la compression se désagrège et il ne reste plus que les grains.



Fig. 23. Structure cristallogranuleuse d'une roche :
Q — quartz ; O — orthoclase ; M — mica

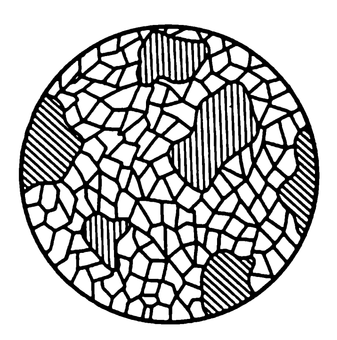


Fig. 24. Texture porphyrique d'une roche

Les roches d'écoulement ont été formées par refroidissement du magma, s'écoulant sous forme de lave sur la surface terrestre (roches récentes) ou dans le voisinage de cette surface sous la forme de veines (roches anciennes), sous des pressions et à des températures voisines des pressions et températures extérieures. Dans ces conditions, le refroidissement a été rapide, ce qui a empêché la formation de gros grains. C'est pourquoi les roches d'écoulement récentes ont une structure pseudo-cristalline ou amorphe, c'est-à-dire vitreuse.

La structure porphyrique des roches d'écoulement anciennes est caractérisée par l'inclusion de gros grains isolés dans la masse des petits grains. Les gros grains se sont formés dans le magma pendant un séjour plus ou moins prolongé dans les couches profondes de l'écorce terrestre (fig. 24).

A chaque roche profonde correspond une roche d'écoulement qui s'est formée à partir de la même masse de magma. Les compositions chimiques et minéralogiques des deux roches correspondantes sont donc identiques.

La silice (SiO_2) est le constituant de base des roches éruptives. Selon la proportion de silice dans ces roches, on classe celles-ci en roches acides (plus de 65% de silice), en roches neutres (65 à 55% de silice) et en roches basiques (moins de 55% de silice).

a) Roches profondes principales

Parmi les roches profondes les plus employées dans la construction, on peut citer le granit, la syénite, la diorite, le gabbro et la labradorite.

Le granit est l'une des roches les plus répandues dans l'écorce terrestre. C'est une roche acide, constituée par du quartz (20 à 40%), du feldspath potassique ou orthoclase (40 à 70%), du mica, de la mouskovite, ou plus souvent de la biotite (5 à 20%), etc. Le granit contient surtout de l'orthoclase. C'est pourquoi sa couleur est généralement grise, gris bleuâtre, ou rouge foncé. La structure du granit est nettement cristalline et granuleuse.

Le granit a une masse volumique comprise entre 2 600 et 2 700 kg/m^3 et une résistance à la compression comprise entre 1 000 et 2 500 kg/cm^2 (parfois davantage). La résistance à la traction est comprise entre 1/40 et 1/60 de la résistance à la compression. Les meilleurs granits pour la construction sont ceux qui contiennent plus de quartz et moins de mica. Selon la grosseur du grain, on classe les granits en granitelles, en granits à grains moyens et à gros grains.

Les granitelles sont des granits à grains fins qui résistent le mieux aux effets mécaniques. Elles s'usent uniformément au frottement, leur érosion est plus lente, et elles se fissurent moins au chauffage que les deux autres groupes. D'une faible porosité et peu hygroscopiques, les granits résistent bien au gel et peuvent résister à plus de 200 cycles de gel et de dégel. Les granits se prêtent bien à la taille et au polis-

sage. Ils sont très employés, surtout pour les parements extérieurs des édifices et ouvrages importants.

La *syénite* diffère du granit par le fait qu'elle ne contient pas de quartz. Sa teneur totale en silice est donc plus faible que dans le granit. Par son aspect, la syénite rappelle le granit, mais elle a un caractère granuleux moins prononcé, et sa couleur est plus sombre. Sa résistance mécanique est voisine de celle du granit, mais elle résiste moins bien à l'érosion.

La *diorite* est une roche granuleuse qui contient près de 75% de feldspath. Cette roche contient également de la hornblende, de l'augite et de la biotite. Sa couleur est grise ou vert foncé. Sa masse volumique varie de 2 800 à 3 000 kg/m^3, et sa résistance à la compression de 1 500 à 2 800 kg/cm^3. La diorite est extrêmement tenace, prend un bon poli et résiste bien à l'érosion. On l'emploie pour faire des pavés et aussi comme pierre de parement.

Le *gabbro* est une roche de composition basique. Il est constitué par de l'augite, de l'olivine et du feldspath. Le gabbro a une structure analogue à celle du granit, principalement du granit à gros grains. Sa couleur peut être grise, vert foncé, vert-brun ou noire. Sa masse volumique varie de 2 900 à 3 300 kg/m^3 et sa résistance à la compression de 2 000 à 3 500 kg/cm^2. On l'utilise pour faire des pavés, pour les revêtements et encore pour la production des pierrailles.

La *labradorite* est une roche du même groupe que le gabbro, constituée principalement par le labrador, minéral caractérisé par ses couleurs chatoyantes : bleu, vert, or, etc. La labradorite est très employée dans la construction comme pierre de revêtement ou de parement (mausolée de Lénine, colonnes de la bibliothèque Lénine, etc.).

b) Roches d'écoulement principales

Aux roches d'écoulement anciennes se rapportent les porphyres et la diabase.

Les *porphyres* comprennent le porphyre quartzeux analogue au granit, le porphyre non quartzeux analogue à la syénite, et la porphyrite analogue à la diorite. Au point de vue des travaux de construction, les propriétés des porphyres sont voisines de celles des roches profondes. Mais, par

suite de l'irrégularité de leur structure et de la présence de gros grains isolés et disséminés (qui sont généralement du feldspath), ils résistent moins bien à l'érosion, et l'on constate que les couches supérieures des gisements sont souvent érodées. Les porphyres résistent beaucoup moins bien à l'usure que les roches profondes.

La d i a b a s e, qui est l'homologue du gabbro, est une roche constituée par des grains de diverses grosseurs, sa couleur est gris foncé ou noir verdâtre. Cette roche a une grande résistance, qui peut atteindre 4 500 kg/cm². D'une forte ténacité et dure à l'usure, elle sert à faire différents matériaux routiers ou encore comme matière première pour les pierres moulées.

Les roches d'écoulement récentes comprennent la trachyte, l'andésite et le basalte.

La t r a c h y t e, analogue à la syénite, est la plus légère des roches d'écoulement. Elle a une masse volumique d'environ 2 200 kg/m³ et une résistance à la compression comprise entre 500 et 900 kg/cm², sa couleur est généralement jaune clair ou grise. Dans la construction, on l'emploie comme maçonnerie ou comme cailloutis dans le béton léger. La trachyte résiste mal au frottement et à l'érosion.

L'a n d é s i t e, analogue à la diorite, a une couleur grise à gris foncé, une masse volumique variant de 2 200 à 2 700 kg/m³ et une résistance variant de 600 à 2 400 kg/cm². Les andésites les plus acides et les plus compactes sont employées pour résister aux acides, sous la forme de plaques de revêtement, ou encore pour constituer le cailloutis des bétons résistant aux acides.

Le b a s a l t e, analogue au gabbro, est la roche d'écoulement la plus répandue. Selon les conditions dans lesquelles le refroidissement s'est produit, sa structure est vitreuse ou bien pseudo-cristalline. La résistance du basalte à la compression atteint parfois 5 000 kg/cm². La dureté et la fragilité des basaltes rendent le travail de ces roches difficile. Aussi, on les emploie principalement pour faire des pavés, dans les revêtements des talus des rives et ouvrages côtiers, ou encore pour constituer le cailloutis dans le béton et pour couler des pierres. Le basalte fondu a une résistance encore plus élevée (jusqu'à 8 000 kg/cm²). On l'emploie pour fabriquer des appareils chimiques résistant aux acides, des tuyaux, des isolateurs électriques, des revêtements, etc.

Outre les roches compactes citées, les roches éruptives comprennent également des roches d'agrégation, produites par le dépôt et l'agglomération de matériaux friables, rejetés par les volcans. On classe les roches d'agrégation en roches friables (cendres et sables volcaniques, pierre ponce) et en roches cimentées ou agglomérées (tufs volcaniques, trass, laves tufacées).

Les cendres volcaniques sont des particules poussiéreuses de forme irrégulière de la lave volcanique, rejetée à l'état morcelé.

La pierre ponce est une roche caractérisée par sa porosité élevée. On appelle ainsi un verre volcanique résultant d'un refroidissement rapide de la lave à l'air accompagné par un dégagement gazeux violent. Les morceaux de pierre ponce ont une grosseur variant de 5 mm à 30 cm ; leur masse volumique moyenne est d'environ 500 kg/m³. Les pores de la pierre ponce sont assez gros mais ils sont fermés, si bien que la pierre ponce a un pouvoir absorbant de l'eau qui est très inférieur à sa porosité. La pierre ponce résiste au gel et n'est pas hygroscopique. Son coefficient de conductivité thermique faible (0,12 à 0,20 kcal/m · h · °C) en fait un bon isolant thermique. Sa résistance à la compression varie de 20 à 30 kg/cm².

On emploie la pierre ponce et les sables de pierre ponce pour constituer le cailloutis et le sable des agrégats dans les bétons légers et également comme abrasif dans les travaux du second œuvre.

Les tufs volcaniques sont des roches poreuses résultant du tassement des cendres volcaniques. Ce tassement varie en fonction des conditions dans lesquelles le dépôt s'est produit. Les trass font partie des tufs volcaniques les plus fortement tassés.

On emploie les tufs, les trass et la pierre ponce finement pulvérisés, de même que les cendres volcaniques, pour constituer des additions hydrophiles dans les liants minéraux (chaux, ciment).

Les laves tufacées résultent de la chute des cendres et sables volcaniques dans de la lave, avant solidification de celle-ci. Une certaine lave tufacée, appelée le tuf artique, est une roche poreuse à structure vitreuse.

Le tuf artique a une masse volumique comprise entre 750 et 1 400 kg/m³, et une résistance à la compression variant de 60 à 100 kg/cm² et même davantage; son coefficient

de conductivité thermique est de 0,3 kcal/m·h·°C et sa couleur tire sur le violet avec diverses nuances. Le tuf résiste bien au gel. Il peut être scié en pierres de forme régulière pour la maçonnerie. Sous forme de cailloutis, il sert d'agrégat dans les bétons légers.

§ 4. ROCHES SÉDIMENTAIRES

Les roches sédimentaires sont les produits de la désagrégation de roches d'origines diverses.

Au cours du temps, les roches sont désagrégées par l'érosion. Les causes et facteurs principaux de l'érosion sont l'eau, le vent et les variations de température. L'eau pénètre dans les fissures, imprègne et dissout progressivement les constituants de la roche et les désagrège pendant les périodes de gel par suite de l'augmentation de volume. Les brusques fluctuations de température fissurent les roches et détachent des blocs de diverses grosseurs. Le vent entraîne les particules produites par la désagrégation. Les produits de désagrégation sont ensuite transportés à diverses distances par le vent, et surtout par les cours d'eau.

L'action de l'air ne se manifeste pas seulement par une désagrégation mécanique, mais encore par les interactions qui se produisent entre les différents constituants des roches et les diverses substances présentes dans l'atmosphère (désagrégation chimique). A titre d'exemple, les feldspaths, et en particulier l'orthoclase, se décomposent en produisant de la kaolinite sous l'action de la vapeur d'eau et du gaz carbonique de l'atmosphère :

$$\underset{\text{(orthoclase)}}{K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2} + 2H_2O + CO_2 =$$

$$= \underset{\text{(potasse)}}{K_2CO_3} + 4SiO_2 + \underset{\text{(kaolinite)}}{Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O}.$$

Le dépôt et l'accumulation des produits de désagrégation forment les roches sédimentaires, classées en conséquence en groupes principaux suivants : roches en conglomérat (dépôts mécaniques), roches d'origine chimique (dépôts chimiques) et roches organogènes, résultat de l'activité biologique et de la mort des organismes vivants, animaux et végétaux, qui peuplent les mers et les lacs.

Les roches sédimentaires sont caractérisées principalement par leur stratification qui résulte du dépôt progressif des produits de désagrégation.

a) Conglomérats

On classe les conglomérats (meubles) selon la grosseur des morceaux ou grains en roches à gros grains, de plus de 2 mm (gravier, sable grossier), en roches à grains moyens, de 0,1 à 2 mm de grosseur (sable), en roches à grains fins, entre 0,01 et 0,1 mm (particules poussiéreuses) et en terrains à grains très fins, de moins de 0,01 mm de grosseur (argiles).

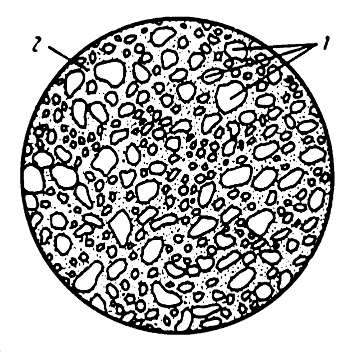


Fig. 25. Schéma de la structure d'un grès :
1 — grains de quartz ; 2 — ciment d'agglomération

Les conglomérats agglomérés par une substance quelconque (argile, calcite, silice, etc.) sont appelés roches cimentées parmi lesquelles les grès jouent le plus grand rôle dans la construction. Les grès sont des sables quartzeux agglomérés par un ciment ; suivant la nature de celui-ci, on distingue les grès argileux, marneux, calcaires, siliceux, etc. La substance agglomérante donne aux grès diverses couleurs particulières.

On emploie surtout dans la construction les grès siliceux et calcaires (fig. 25). Les premiers sont agglomérés par de la silice, les deuxièmes par de la calcite. Les grès siliceux sont les plus résistants. Leur résistance à la compression peut atteindre 2 500 kg/cm². Leur dureté élevée rend leur travail difficile. La masse volumique élevée des grès (jusqu'à 2 700 kg/m³) et leur coefficient de transmission thermique qui est également élevé ne permettent pas de les employer dans les murs des bâtiments non chauffés, les fondations, les murs de soutènement, les quais ou encore les marches d'escaliers et les bordures de trottoirs. Les grès particulièrement résistants sont employés dans les parements des édifices et ouvrages. On les utilise également sous forme de cailloutis et de moellons.

b) Roches d'origine organogène

Ces roches sont constituées par les débris des organismes ayant vécu dans les eaux salées et les eaux douces. Elles comprennent diverses roches carbonatées et siliceuses. Dans les constructions, on utilise les calcaires, calcaires coquilliers, craie dont le constituant essentiel est la calcite, et les diatomites et la terre d'infusoires qui sont principalement constituées par de la silice amorphe.

Les c a l c a i r e s sont constitués principalement par du carbonate de calcium $CaCO_3$. Ils se sont formés dans les mers, principalement à partir des résidus de coquillages de mollusques (roches zoogènes), mais en partie également par des dépôts chimiques (précipités de carbonate de calcium). Les accumulations meubles de coquillages ont été ensuite tassées par la pression de l'eau et consolidées par du carbonate de calcium pour donner une roche plus ou moins compacte.

Les calcaires ont à peu près la dureté 3 dans l'échelle des duretés. La présence d'une quantité importante de silice accroît leur dureté et leur résistance mais rend leur travail plus difficile. La masse volumique des calcaires varie de 1 700 à 2 600 kg/m^3. Ils sont généralement blancs, mais diverses impuretés peuvent leur donner d'autres couleurs. Quand ils contiennent plus de 3% d'argile, ils deviennent hydrophiles et résistent mal au gel. En fonction de la proportion de carbonate de calcium, on distingue les calcaires purs (au moins 98%), les calcaires marneux (au moins 90%), les marnes calcaires (au moins 75%), les marnes (au moins 40%) et les marnes argileuses (au moins 10%). On utilise des marnes d'une composition bien déterminée, pour fabriquer le ciment Portland.

La résistance des calcaires varie de 80 à 2 000 kg/cm^2, suivant leur compacité et leur composition. Ils forment habituellement des gisements en forme de couches.

Les calcaires compacts servent à faire des plaques et des pierres façonnées pour le revêtement des murs, les marches d'escaliers, les appuis de fenêtres et les soubassements, les plaques de forme irrégulière servent de moellons. On se sert également des calcaires pour préparer les pierrailles destinées à la cuisson de la chaux pour fabriquer le ciment Portland, etc.

On peut scier facilement les calcaires poreux et les calcaires coquilliers pour obtenir des pierres de maçonnerie

de diverses dimensions. La masse volumique du calcaire coquillier varie de 600 à 1 500 kg/m³, et sa résistance à la compression de 4 à 50 kg/cm².

La craie est formée de débris microscopiques de protozoaires. En principe, sa composition est la même que celle du calcaire, et sa résistance mécanique est faible. On

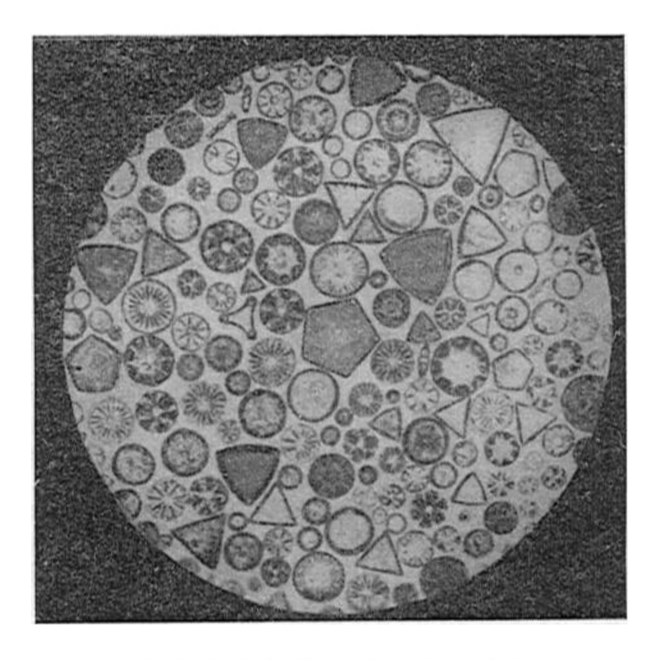


Fig. 26. Diatomite (très grossie)

l'emploie pour fabriquer la chaux, certaines peintures, des mastics, etc., ainsi que dans la fabrication du ciment.

La diatomite et la terre d'infusoires sont des masses cohésives ou non cohésives, qui sont riches en silice amorphe et qui peuvent être soit faiblement soit pas du tout cimentées.

Ces matériaux sont formés à partir des carapaces des végétaux aquatiques du genre des diatomées qui peuplent les fleuves et la mer (fig. 26). Ces carapaces se déposent sur

le fond des bassins d'eau où elles s'entassent. Entre elles se dépose un limon ou une argile extrêmement fins. Dans la terre d'infusoires, qui est d'origine plus ancienne, les carapaces ont été transformées en de petites sphérules d'opale agglomérées par un ciment également opalin.

Les diatomites et terres d'infusoires de qualité supérieure contiennent 75% à 96% de silice. Elles ont presque la même composition chimique et les mêmes propriétés physiques : masse volumique comprise entre 350 et 950 kg/m³ ; coefficient de transmission de la chaleur compris entre 0,15 et 0,20. On emploie beaucoup les diatomites et les terres d'infusoires comme matériaux calorifuges et comme matières hydrauliquement actives que l'on ajoute aux liants.

c) Roches d'origine chimique (sédiments chimiques)

La magnésite naturelle est du carbonate de magnésium $MgCO_3$. On l'emploie pour fabriquer des matériaux réfractaires et un liant magnésien qui est la magnésite caustique.

La dolomite naturelle comprend principalement un carbonate double de calcium et de magnésium $CaCO_3 \cdot MgCO_3$, qui porte le même nom. La dolomite a des propriétés voisines de celles des calcaires compacts, mais ses propriétés mécaniques sont parfois plus élevées. On utilise la dolomite comme pierre de construction, comme agrégat dans le béton, pour obtenir des matériaux réfractaires, ou encore comme liant (dolomite caustique).

Le gypse naturel est un sulfate de calcium hydraté $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, que l'on emploie pour fabriquer les liants à base de gypse.

La couleur du gypse varie suivant les impuretés qu'il contient, mais il est généralement blanc.

L'anhydrite naturelle, qui est du sulfate de calcium $CaSO_4$, sert à obtenir des liants, ainsi que des plaques pour les revêtements intérieurs. L'anhydrite a le même aspect que le gypse et on rencontre habituellement ces deux minéraux dans un même gisement.

Les tufs calcaires se sont formés par précipitation du carbonate de calcium à partir des eaux carbonatées souterraines, froides ou chaudes. Les tufs calcaires très poreux sont une matière première servant à la fabrication

de la chaux. Les tufs calcaires compacts à porosités fines et uniformément réparties sont utilisés dans les revêtements extérieurs des édifices.

§ 5. ROCHES MÉTAMORPHIQUES

Les roches métamorphiques employées dans la construction sont les gneiss, les marbres, la quartzite et les schistes argileux.

Par leur composition minéralogique, les gneiss sont voisins des granits. Il se sont formés à partir de ces derniers par recristallisation sous une forte pression. Les gneiss ont une texture stratifiée.

Cette stratification facilite l'extraction et le travail des gneiss mais nuit aux caractéristiques de ces pierres. Les gneiss peuvent être clivés assez facilement suivant les plans de stratification. Ils peuvent se séparer d'eux-mêmes en plusieurs couches, à la suite de cycles de gel et de dégel. La texture stratifiée réduit la résistance des gneiss à l'érosion. En principe, on les emploie dans les constructions au même titre que les granits. Néanmoins, leur utilisation est quelque peu limitée. Ils servent de préférence comme plaques de revêtement des canaux et des quais, comme maçonnerie pour les fondations, comme bordure de trottoirs, etc.

Les schistes argileux sont des roches argileuses dures à structure stratifiée. Ils se sont formés à partir d'argiles fortement comprimées et en partie recristallisées sous forte pression. C'est ce dernier facteur qui a conditionné leur structure stratifiée indépendamment de la stratification initiale de l'argile en tant que roche sédimentaire. A la différence des argiles, les schistes argileux sont extrêmement durs et ne se désagrègent pas dans l'eau. Lorsqu'on mélange une poudre schisteuse à de l'eau, elles ne forment pas une pâte plastique.

Les schistes argileux sont généralement gris foncé. On peut les cliver facilement pour obtenir des plaques minces et régulières que l'on emploie pour construire des toitures très durables (ardoises naturelles).

Les marbres sont constitués par des cristaux plus ou moins gros de spath calcaire (calcite) contenant parfois également quelques grains de dolomite. Les cristaux sont souvent visibles à l'œil nu ; ils sont solidement agglomérés sans aucun liant de cimentation.

Les marbres se forment à partir des calcaires, sous l'action d'énormes pressions qui provoquent une recristallisation des calcaires.

Les marbres sont généralement d'un blanc neigeux, mais ils peuvent être également de couleur rose, jaune, rouge, noire, etc., suivant les impuretés qu'ils contiennent. Ils présentent souvent des veines ou autres dessins colorés. Leur résistance à la compression est d'environ 1 200 kg/cm². On peut facilement scier les marbres pour obtenir des plaques minces, et leur compacité élevée permet de les polir facilement. On les emploie dans divers revêtements. Ils servent également à faire des plaques pour les intérieurs, les marches d'escalier, les appuis des fenêtres, etc.

Les marbres utilisés dans les revêtements extérieurs des bâtiments et autres ouvrages s'érodent sous l'influence des agents atmosphériques (dont le plus important est le gaz sulfureux contenu dans l'atmosphère des centres industriels). Dans ces conditions, le marbre perd son brillant et sa couleur s'altère.

La *quartzite* est une transformation métamorphique des grès siliceux. Elle comprend des grains de quartz recristallisés si fortement agglomérés entre eux que l'on ne peut plus distinguer la substance agglomérante (ciment). La quartzite est blanche ou bien, sous l'effet des impuretés, rouge, violette, ou rouge foncé. Elle résiste bien à l'érosion, et sa résistance à la compression peut atteindre 4 000 kg/cm².

La quartzite est difficile à travailler du fait que sa dureté est élevée. On l'utilise généralement aux points cruciaux des bâtiments et ouvrages (par exemple, comme pierres de culée des ponts, comme revêtement des façades). On l'emploie également parfois pour les marches d'escaliers, ou encore sous forme de moellons ou de cailloutis. La quartzite est la matière première de certains produits réfractaires.

§ 6. CLASSIFICATION ET ESSAIS DES PIERRES NATURELLES

Les propriétés physiques et mécaniques principales des pierres naturelles peuvent varier considérablement, même au sein d'un même gisement. Au cours de la prospection et de l'exploitation de chaque gisement ou carrière, il faut donc prélever des échantillons, ou éprouvettes, pour les soumettre à des essais.

Les essais des pierres naturelles sont effectués conformément aux normes d'Etat de l'U.R.S.S. ou à des spécifications techniques, et déterminent les propriétés suivantes : masse spécifique et volumique, porosité, absorption d'eau, résistance à la compression à l'état sec et à l'état saturé, coefficient de ramollissement.

On classe les pierres naturelles en diverses « qualités » d'après les diverses valeurs de leurs propriétés principales :

qualités d'après la masse volumique à l'état sec : pierres ordinaires, d'une masse volumique égale ou supérieure à 1 800 kg/m^3, et pierres légères, d'une masse volumique plus faible ;

qualités d'après la résistance à la compression (en kg/cm^2) : pierres légères, 4-7-10-15-25-35-50-75-100-150-200 ; pierres ordinaires, 100-150-200-300-400-500-600-800-1000 ;

qualités d'après la résistance au gel : 10-15-25-35-50-100-150-200 ;

qualités d'après le coefficient de ramolissement : 0,6-0,75-0,9 et 1,0.

On soumet à l'essai d'abrasion les pierres qui sont destinées aux pavages, aux bordures de trottoirs, aux sols, aux marches d'escalier, etc. Enfin, les matériaux servant aux pavages sont également essayés aux chocs (à la sonnette) et à l'usure (dans un tambour).

§ 7. DIVERSES CATÉGORIES DE MATÉRIAUX NATURELS

a) Pierres meulières

Les moellons sont des pierres assez grosses pesant de 15 à 40 kg, et de forme irrégulière, obtenues directement par extraction des roches calcaires, des dolomites et des grès. Ces pierres ne doivent contenir aucune impureté argileuse ou friable. Les moellons provenant de roches sédimentaires doivent avoir une résistance à la compression d'au moins 100 kg/cm^2, et un coefficient de ramollissement d'au moins 0,75.

On emploie les pierres brutes meulières pour les fondations en moellons et en moellons enrobés de béton, les murs des bâtiments non chauffés, les murs de soutènement. On

transforme également les moellons bruts en cailloutis servant d'agrégat dans le béton.

Dans les maçonneries, il est préférable d'employer des moellons d'assise. Cela permet de procéder par assises, ce qui accroît la solidité de la maçonnerie et réduit la consommation de liant. La mise en œuvre des moellons demande une main-d'œuvre importante et une grande quantité de liant pour combler les vides.

On obtient des p a v é s de jusqu'à 300 mm en faisant éclater la masse rocheuse ou des blocs de grandes dimensions. On les emploie comme revêtement des chaussées, des cours, des talus, pour construire des digues par remblayage. Les pavés peuvent être également transformés en moellons et en cailloutis.

b) Pierres d'appareil, dalles et plaques, pierres façonnées

Les p i e r r e s d'a p p a r e i l, l e s p l a q u e s, employées dans les revêtements, sont obtenues à partir de blocs débités du massif rocheux par fendage, pour être ensuite sciées ou taillées sur des machines. On détache les blocs du massif rocheux (en profitant des fissures dans le massif), en y forant des trous ou bien en introduisant des coins. Dans les roches dures, on fait exploser de petites charges dans des trous de mine forés au préalable. Les pierres d'appareil en calcaire coquillier sont détachées de la masse rocheuse au moyen de machines spéciales à scier les pierres. En Union Soviétique, pour scier de gros blocs dans des masses de marbre on utilise plus particulièrement les machines universelles de A. Stoliarov (fig. 27) et autres. L'emploi de machines pour scier les pierres accroît la productivité du travail, permet d'obtenir de gros blocs de formes régulières et de qualité supérieure et réduit les rebuts. Les pierres d'appareil, sciées et taillées, pour la maçonnerie des bâtiments chauffés (murs extérieurs et murs intérieurs) ainsi que pour les cloisons sont des pierres en calcaire coquillier, en calcaire tendre, en tuf volcanique, ou d'autres pierres légères trouvées sur place. Les pierres doivent être sans fils d'argile ou de marne, et ne doivent porter aucune trace d'érosion. Elles ne doivent pas se fissurer ni commencer à cliver après 50 cycles de saturation et de séchage. Le coefficient de ramollissement des pierres de maçonnerie ne doit pas être inférieur à 0,6 et celui des pierres de parement inférieur à 0,75.

Pour les revêtements extérieurs des édifices et autres ouvrages, on emploie les roches suivantes : roches compactes : granits, syénites, diorites, gabbros, labradorites, quartzites ; roches de compacité moyenne : calcaires compacts, dolomites, grès et certains schistes cristallins. Pour les revêtements

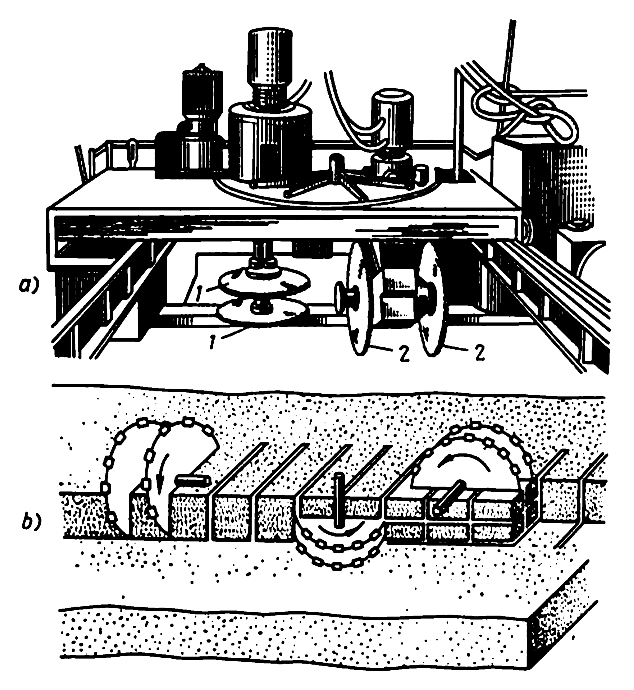


Fig. 27. Schéma de la machine de A. Stoliarov à scier les pierres :

a — schéma de la machine : 1 — scies horizontales (coupe horizontale) ; 2 — scies verticales (coupe verticale) ; b — schéma de sciage des pierres en carrière

intérieurs, on emploie des marbres et des anhydrites. Les roches employées pour les revêtements extérieurs doivent résister aux intempéries. Elles ne doivent comporter ni fissures ni traces d'érosion, elles doivent avoir une couleur agréable et stable, et ne contenir aucune impureté, argileuse ou autre.

Les pierres d'appareil et les plaques préparées en ateliers spéciaux aménagés près des carrières reçoivent des parements

ayant un aspect décoratif et une facture particulière. Dans ce but, on les travaille par martelage superficiel, à l'aide de divers outils du tailleur de pierres, généralement, des marteaux pneumatiques à embout interchangeable de formes diverses ; mais, on peut aussi les scier, les travailler à la fraise, puis les polir.

On emploie les pierres d'appareil et les plaques (en grès, calcaire, granit, etc.) pour les revêtements des édifices et ouvrages. Les gros blocs sont débités en plaques dans des ateliers de taille des pierres, sur des machines à scier spéciales dotées de scies à dents en alliages durs. Les pierres d'appareil et les plaques coûtent cher. Aussi, faut-il limiter leur emploi.

Les plaques sciées coûtent moins cher que les plaques taillées. On peut leur donner une faible épaisseur (50 mm pour un revêtement extérieur et 25 mm pour un revêtement intérieur, alors que les plaques taillées ont une épaisseur d'au moins 100 à 200 mm) et des parements réguliers, ce qui simplifie leur préparation ultérieure. Les plaques de revêtement extérieur ont une largeur de l'ordre de 600 mm (roches dures) ou de 400 mm (roches de dureté moyenne). Cette largeur est de l'ordre de 300 mm pour les revêtements intérieurs. La longueur des plaques n'est pas normalisée, ce qui permet de mieux utiliser la pierre naturelle. Les plaques sciées ont une plus grande résistance que les plaques taillées car les coups de l'outil à la taille détachent et brisent les grains des minéraux, et par suite provoquent des microfissures. Les plaques employées dans les revêtements des soubassements doivent être préparées en roches très dures (fig. 28).

On fabrique des plaques non seulement pour les revêtements, mais également pour les appuis des fenêtres (ce qui est onéreux, et par suite n'est pratiqué que pour des édifices de haut standing), pour les sols, les bordures de trottoirs. Ces plaques sont surtout en roches sédimentaires stratifiées ou en roches métamorphiques schisteuses.

La meilleure façon de préparer la surface des pierres est de se servir de fraises. Ceci permet d'obtenir des surfaces lisses, planes ou profilées, et de boucharder les plaques sur leur contour.

Pour transporter les plaques de revêtement, sciées ou taillées, on les place sur tranche avec interposition de cales. Les plaques polies sont placées face contre face (avec interposition d'un papier intercalaire) et rangées dans des cais-

ses dont le poids brut ne dépasse pas 150 kg. On les transporte également dans divers containers.

On obtient les plaques de couverture (en ardoise naturelle) par clivage et sectionnement d'un schiste argileux spécial (de couverture). Ces plaques ont 250× ×150 mm et 600 × 350 mm, et une épaisseur de 4 à 8 mm.

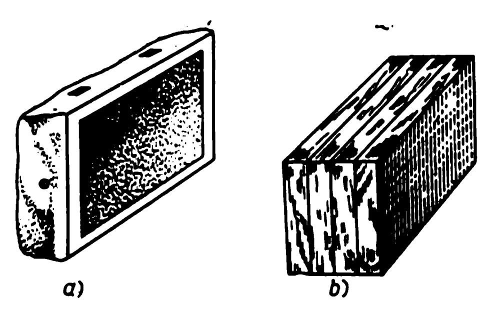


Fig. 28. Plaque taillée (*a*), plaque sciée (*b*)

La résistance de ces plaques à la flexion ne doit pas être inférieure à 150 kg/cm². Elles doivent pouvoir supporter 25 cycles de gel et de dégel. L'ardoise naturelle est le matériau de couverture qui dure le plus longtemps.

§ 8. PROTECTION DES PIERRES NATURELLES CONTRE L'ÉROSION

Pour protéger les pierres naturelles mises en œuvre dans les divers ouvrages contre l'érosion, qui modifie progressivement leur aspect et finit par les détruire, on adopte diverses dispositions constructives, ou bien l'on applique une couche imperméable sur leur parement.

Les mesures prises dans le bâtiment pour protéger les plaques de pierre consistent à prévoir un bon écoulement des eaux et à donner aux pierres des parements très lisses, par polissage. Les pierres dont la porosité est appréciable sont imprégnées de diverses matières jusqu'à une profondeur suffisante, ce qui rend surface étanche et empêche l'eau d'accéder à l'intérieur.

Le meilleur procédé pour améliorer les qualités des pierres calcaires consiste à les imprégner superficiellement avec une solution d'un sel de l'acide silicofluorhydrique (par exemple, silicofluorure de magnésium ou d'aluminium)

dénommé fluate et qui réagit avec le carbonate de calcium pour former de la silice et des sels fluorés, qui sont insolubles dans l'eau.

Les sels fluorés et la silice obturent les pores de la couche superficielle, ce qui augmente l'étanchéité de cette couche. Quand il s'agit d'autres roches, on imprègne tout d'abord la surface des pierres avec un produit dénommé avant-fluate ou préfluate, qui est une solution d'un sel de calcium (par exemple, chlorure de calcium), puis avec un fluate.

Une autre méthode efficace pour protéger les pierres contre l'érosion consiste à traiter leurs surfaces avec des résines polymères qui bouchent les pores, rendant ainsi les pierres étanches. Cette méthode est toutefois encore à l'épreuve.

CHAPITRE IV

PRODUITS CÉRAMIQUES

Les produits céramiques sont ceux fabriqués en argile, avec ou sans addition d'autres produits par moulage, séchage et cuisson.

On classe les matériaux de construction céramiques en deux groupes : matériaux poreux et matériaux compacts. Les matériaux poreux ont une capacité d'absorption d'eau de 5% et davantage, alors que les matériaux compacts ont une capacité d'absorption d'eau inférieure.

Les matériaux poreux comprennent les briques d'argile, les briques poreuses, les briques creuses, les pierres céramiques murales creuses, les tuiles, les tuyaux céramiques d'assainissement et les carreaux de revêtement.

Les carreaux pour sols et les briques employées dans les pavages routiers sont des produits céramiques compacts.

La fabrication des produits céramiques est l'une des plus anciennes du monde. Elle est apparue plusieurs millénaires avant notre ère.

Les produits céramiques ont les avantages suivants : résistance mécanique élevée, longue durée (ce qui permet de les employer dans presque tous les éléments d'un bâtiment), de plus, on trouve la matière première presque partout. Parmi leurs défauts, il faut indiquer la fragilité, et parfois, une masse volumique élevée.

§ 1. MATIÈRES PREMIÈRES DES PRODUITS CÉRAMIQUES

a) Argile

Les matières minérales qui forment l'argile dans la nature résultent de la désagrégation de diverses roches, et principalement des feldspaths, sous l'action de l'eau et de l'acide

carbonique. Ainsi que nous l'avons vu dans le troisième chapitre, la désagrégation des feldspaths produit la kaolinite, un des principaux constituants des argiles.

Le professeur P. Zémiatchinsky, spécialiste soviétique éminent dans l'étude des argiles, a désigné sous le nom d'argile des masses minérales et des roches terreuses désagrégées capables de former avec l'eau une pâte plastique qui conserve après séchage la forme qu'on lui a donnée, et qui prend après cuisson la dureté de la pierre.

b) Classification des argiles

On classe les argiles en argiles autochtones, qui se trouvent encore là où elles se sont formées, et en argiles secondaires, qui ont été transportées par l'eau.

Les argiles autochtones contiennent encore généralement des particules de la roche de base.

Les argiles secondaires sont plus fines, et contiennent relativement peu de résidus rocheux.

Au point de vue de l'action de la chaleur, on subdivise les argiles en argiles réfractaires, argiles peu fusibles et argiles très fusibles.

Les argiles réfractaires sont les plus pures ; elles contiennent relativement peu d'impuretés mécaniques, sous la forme de flux ou fondants (quartz, feldspaths, micas, combinaisons du fer, etc.). Ces argiles résistent à une chaleur de plus de 1 580 °C.

Les argiles peu fusibles contiennent beaucoup plus d'impuretés (flux ou fondants) que les argiles réfractaires. On les emploie pour fabriquer les briques peu fusibles, briques de revêtement et de parement, les carreaux pour sols, les tuyaux d'assainissement.

Les argiles très fusibles sont les plus variées par leurs constituants. Elles contiennent une proportion importante de diverses autres substances : sable quartzeux, oxydes du fer, calcaires, substances organiques.

On emploie les argiles très fusibles pour confectionner les briques ordinaires, les briques creuses ou poreuses, les tuiles et les pierres creuses céramiques.

Ces argiles résistent à une chaleur inférieure à 1 350 °C.

c) Propriétés des argiles

Les propriétés les plus importantes des argiles sont, au point de vue de la fabrication des matériaux céramiques, les suivantes : plasticité, comportement au séchage, comportement à la cuisson.

La plasticité du mélange d'argile et d'eau (pâte d'argile) permet de fabriquer différents objets céramiques moulés avec de l'argile.

Le degré de plasticité d'une pâte d'argile dépend de la composition minéralogique et granulométrique de l'argile, de la forme et de l'état de surface des grains, et de la présence de substances dites amaigrissantes (sable et autres impuretés à gros grains). On peut accroître la plasticité d'une argile en lui ajoutant une autre argile plus plastique, en l'engraissant, c'est-à-dire en la débarrassant du sable qu'elle contient, en la laissant se reposer, en la travaillant mécaniquement, etc.

Les particules de l'argile reçoivent, selon leurs dimensions, les désignations suivantes : de sable — entre 5 et 0,15 mm, de poussière — entre 0,15 et 0,005 mm, et d'argile — au-dessous de 0,005 mm.

Retrait à l'air. Pendant le séchage à l'air d'une pièce moulée en argile, les dimensions linéaires (et par suite le volume) diminuent à mesure que cette pièce perd son eau, par suite du rapprochement des particules d'argile. Ce phénomène est appelé retrait à l'air, car il se produit à la température ordinaire de l'air.

On exprime le retrait linéaire à l'air par le rapport (en pourcentage) d'une dimension de la pièce à l'état sec à la valeur initiale de cette même dimension. A l'état humide, le retrait est de 5 à 12%.

Le comportement de l'argile au chauffage est l'une des propriétés les plus importantes de ce matériau. Au cours de la cuisson, une pièce moulée en argile se transforme en une masse dure comme de la pierre, qui résiste à l'eau.

Au cours de la cuisson, la couleur de l'argile se modifie, sa résistance mécanique augmente, et son volume diminue (retrait de cuisson). Il se produit une augmentation de la compacité du corps de la pièce, par agglutination. Le retrait de cuisson est de 1 à 2%.

La couleur des pièces cuites dépend des matières étrangères contenues dans l'argile, principalement des oxydes de

fer, qui colorent les pièces céramiques en rouge ou en jaune (quand ces objets contiennent de la chaux).

L'augmentation de la résistance mécanique des pièces céramiques par la cuisson est due principalement à la fusion des constituants les plus fusibles de l'argile, et aux interactions qui se produisent entre ces constituants à température élevée. Au cours du refroidissement, les constituants fondus cimentent et agglomèrent les particules non fondues, ce qui donne à l'argile la consistance de la pierre.

d) Matériaux amaigrissants

Outre les argiles plus ou moins plastiques, l'industrie céramique utilise également des matériaux non plastiques que l'on appelle d'une façon générale « les additions amaigrissantes ». On ajoute ces substances à de nombreuses masses céramiques pour réduire le retrait au séchage et à la cuisson, pour améliorer les propriétés de moulage, et pour faciliter le dégagement de l'eau au cours du séchage.

Les additions amaigrissantes peuvent être des substances minérales : sable, chamotte (argile cuite et argile broyée), scories broyées, etc. On emploie également des matières organiques : poussières de charbon, sciure de bois, etc. En plus de l'influence indiquée précédemment, les additions organiques en calcinant augmentent la porosité des matières céramiques et réduisent leur masse volumique.

§ 2. MAÇONNERIES

Les produits céramiques sont caractérisés par une très grande diversité en ce qui concerne les propriétés physiques et mécaniques, la forme, les applications, etc. Néanmoins, la méthode de production demeure à peu près la même pour toutes les matières et comprend les opérations suivantes :

extraction de l'argile dans un gisement ou une carrière :

préparation de la matière: broyage et malaxage de l'argile avec d'autres substances, humectation et brassage parfait de la masse argileuse ;

façonnage des objets à partir de la masse ainsi obtenue ;

séchage des pièces moulées ;

cuisson.

a) Briques ordinaires en argile

Une brique d'argile est une pierre artificielle qui a la forme d'un parallélépipède rectangle de dimensions déterminées, obtenue par moulage et cuisson à partir d'une argile très fusible, et additionnée ou non de matières amaigrissantes.

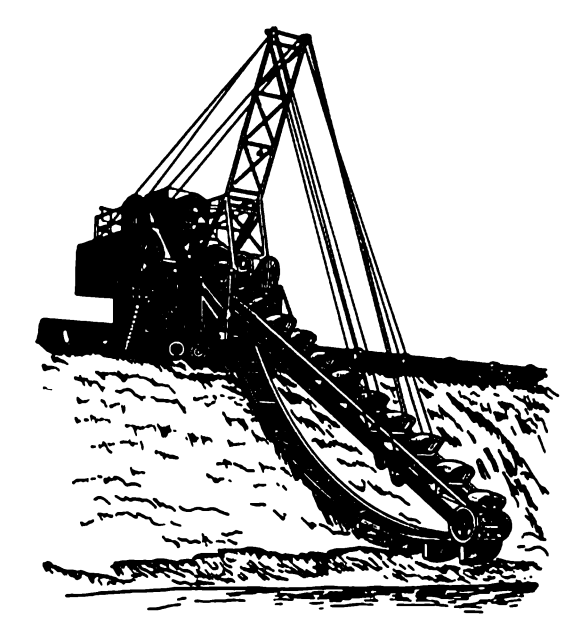


Fig. 29. Excavatrice à godets

Les briqueteries traitent toujours une matière première locale. L'argile extraite des carrières voisines par des excavatrices (fig. 29) est envoyée à la briqueterie par wagonnets ou bennes.

On fabrique les briques selon deux procédés : *procédé plastique* et *procédé par voie demi-sèche.*

Le procédé plastique est le plus répandu. Dans ce procédé, l'argile à broyer passe d'abord entre des cylindres (fig. 30), puis dans un malaxeur (fig. 31). Dans ce malaxeur, l'argile est humectée d'eau de 18 à 25%, et brassée jusqu'à obtenir une masse plastique homogène se prêtant facilement au moulage.

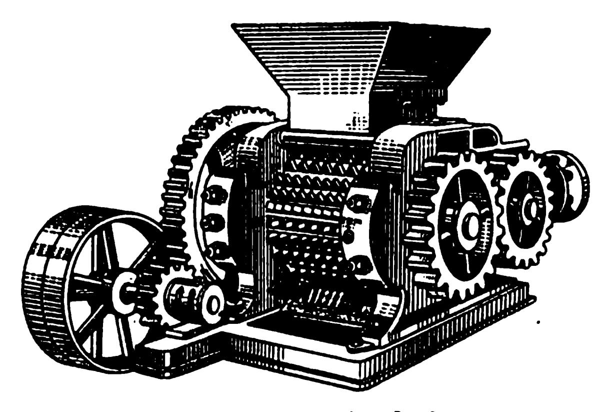


Fig. 30. Broyeur à cylindres

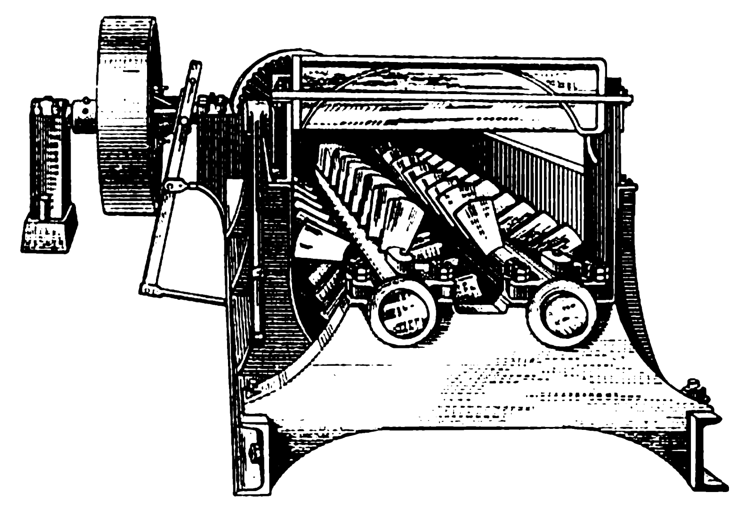


Fig. 31. Malaxeur

La masse ainsi préparée passe à la filière de façonnage des briques (fig. 32).

La pâte d'argile est versée dans la goulotte de réception *1* et évincée parallèlement à l'axe par la vis *2* vers la tuyère *3*. La section de passage de cette tuyère *3* est plusieurs fois plus petite que la section transversale de la presse. La matière qui passe par cette tuyère est donc calibrée par la

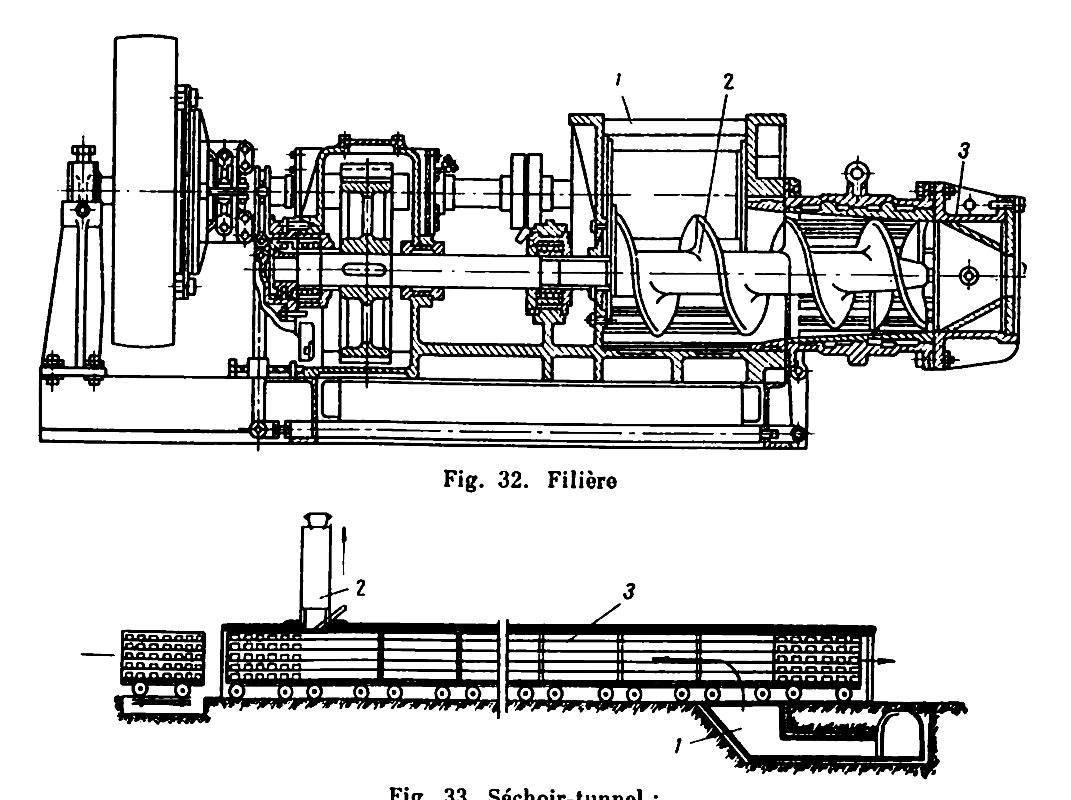


Fig. 32. Filière

Fig. 33. Séchoir-tunnel :
1 — arrivée des gaz chauds ; 2 — cheminé de tirage ; 3 — wagonnets

pression de la vis et sort sous forme d'une bande de section rectangulaire. Le calibrage dépend de la forme de la filière. Les cotes de la section de cette bande sont la longueur et la largeur de la brique majorées de valeurs égales à la somme du retrait à l'air et à la cuisson.

Pour obtenir des briques brutes de dimensions voulues, on tronçonne la bande débitée à l'aide des fils fins en acier d'un dispositif de tronçonnage.

Grâce aux perfectionnements de ces dernières années, la productivité de ces presses a considérablement augmenté, et peut atteindre actuellement 10 000 briques par heure.

L'industrie soviétique produit et emploie actuellement des groupes d'étirage sous vide dans lesquels la masse argileuse est comprimée et de plus perd une partie de l'air qu'elle contient, ce qui accroît la plasticité et la compacité de la masse, ainsi que la résistance des pièces fabriquées.

Le séchage des briques brutes s'opère soit en plein air, soit sous des hangars, soit dans des séchoirs artificiels, à une température pouvant atteindre 90 °C. Pour qu'une briqueterie puisse produire toute l'année durant, il faut qu'elle emploie des séchoirs artificiels (fig. 33) pouvant être utilisés indépendamment de la saison et des conditions météorologiques. Le séchage ne dure que 2 à 3 jours dans ces séchoirs artificiels, alors que le séchage naturel en plein air dure de 8 à 15 jours.

La cuisson est la dernière opération de fabrication des objets céramiques. On peut diviser cette opération en trois périodes ou phases: réchauffage de la pièce brute, cuisson proprement dite et refroidissement des pièces cuites.

Pendant la première période, la pièce brute perd son eau, les impuretés organiques brûlent, et toute la masse de la pièce se réchauffe uniformément. Pendant la deuxième période, la plus délicate, il y a formation d'une masse analogue à la pierre. Pendant la troisième période, la pièce se refroidit progressivement (un refroidissement rapide peut provoquer des fissurations).

Les fours à briques sont de deux types : *fours périodiques* dans lesquels le chargement, la cuisson, le refroidissement et le déchargement se font successivement, et les *fours continus*, dans lesquels ces opérations se font simultanément, mais dans des zones différentes du four. On ne construit que très rarement des fours périodiques, et uniquement pour de petites entreprises.

Parmi les fours continus, il faut distinguer le four tournant et le four-tunnel. Dans le four tournant, le matériau traité est immobile tandis que la zone de cuisson ou de combustion se déplace (c'est-à-dire la goulotte d'alimentation en combustible). Dans le four-tunnel, les pièces traitées sont véhiculées dans des wagonnets spéciaux à travers la zone de cuisson qui demeure fixe.

Depuis quelque temps, on ne construit plus de fours tournants parce qu'ils permettent difficilement de mécaniser le chargement et le déchargement. Mais ils sont encore les plus répandus dans les briqueteries actuellement en service.

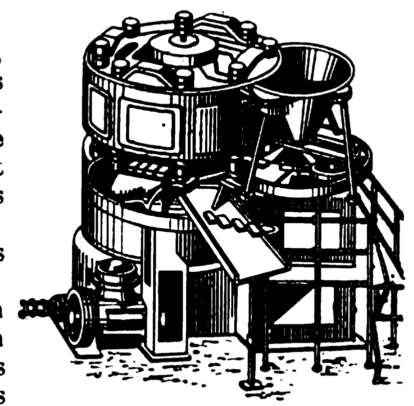


Fig. 34. Presse-système de A. Mélia pour fabrication des briques par voie demi-humide

Le four-tunnel est un véritable tunnel de cuisson dans lequel les wagonnets portant les briques brutes se déplacent sur rails. Selon les pièces traitées, la longueur du tunnel peut varier de 60 à 150 m, et sa section libre de 3,5 à 5,5 m². Un four-tunnel comprend trois zones : réchauffage, cuisson et refroidissement. La cuisson est plus rapide dans les fours-tunnels que dans les fours tournants.

Le four-tunnel est le plus économique des fours employés pour confectionner les briques. Il est plus perfectionné que les fours tournants du fait qu'il demande moins de la main-d'œuvre, améliore les conditions du travail, facilite la mécanisation de la cuisson et permet d'utiliser plus efficacement la chaleur. Aussi, il se répand de plus en plus.

Dans la confection des briques, par voie demi-humide, l'argile séchée et finement broyée est soigneusement brassée et additionnée de 8 à 12 % d'eau. On comprime les briques brutes dans des presses spéciales, sous une pression qui peut atteindre 150 kg/cm².

La presse la plus perfectionnée est la presse de l'inventeur soviétique A. Mélia (fig. 34). On emploie cette presse pour comprimer à sec les briques ordinaires et les briques creuses. Sa productivité horaire peut atteindre 6 000 bri-

ques. Les briques fabriquées à sec doivent satisfaire aux mêmes conditions de qualité que les briques fabriquées par moulage plastique.

Comparée à la méthode de fabrication par plasticité, la méthode de fabrication par voie demi-humide a l'avantage de permettre d'employer des argiles faiblement plastiques, ce qui permet de mettre en œuvre des matières premières plus variées.

En outre, dans la méthode par voie demi-humide, on utilise au moulage une pâte d'argile beaucoup moins saturée d'eau. Cela simplifie le séchage, demande moins de combustible et réduit considérablement le prix des briques.

Le procédé de pressage par voie demi-humide a pour inconvénient de nécessiter un matériel de pressage plus compliqué, et de donner des briques ayant une masse volumique un peu plus élevée et une résistance à la flexion un peu plus faible.

La brique doit avoir la forme d'un parallélépipède rectangulaire à arêtes vives et à faces lisses. Les dimensions d'une brique sont de 250 × 120 × 65 mm ; le retrait à l'air et le retrait de cuisson étant inévitables, il est difficile d'obtenir des briques ayant rigoureusement les dimensions normalisées. Aussi, les normes soviétiques prévoient les tolérances suivantes sur les cotes : ±6 mm sur la longueur, ±4 mm sur la largeur et ±3 mm sur l'épaisseur.

Tableau 6

Caractéristiques de résistance des briques

Marque ou qualité	Charge de rupture, kg/cm², au moins					
	à la compression		à la flexion			
	brique obtenue par pressage plastique et demi-sec		brique obtenue par pressage plastique		brique obtenue par pressage demi-sec	
	moyenne de 5 échantillons	minimum absolu	moyenne de 5 échantillons	minimum absolu	moyenne de 5 échantillons	minimum absolu
150	150	125	28	14	20	10
125	125	100	25	12	18	9
100	100	75	22	11	16	8
75	75	50	18	9	14	7

On a également fixé les tolérances des flèches des faces et des arêtes : 4 mm de champ et 5 mm sur tranches.

On distingue 4 marques ou qualités de briques, d'après leur résistance à la compression et à la flexion : 150 ; 125 ; 100 et 75.

On trouvera au tableau 6 les caractéristiques de résistance de ces quatre marques de briques à la compression et à la flexion.

La capacité d'absorption d'eau d'une brique ne doit pas être inférieure à 8 %, et sa masse volumique doit être comprise entre 1 700 et 1 900 kg/m^3.

Une brique saturée d'eau doit pouvoir supporter au moins 15 cycles de gel et de dégel, la température de gelée ne dépassant pas —15 °C. L'absence de toute trace de détérioration indique que la brique peut résister au gel.

On emploie essentiellement les briques dans les murs extérieurs et intérieurs des immeubles d'habitation, édifices publics et bâtiments industriels, ainsi que pour les piliers intérieurs.

b) Briques efficaces

La brique en argile souffre de deux inconvénients, qui sont une masse volumique élevée et un coefficient de transmission thermique élevé (0,7 kcal/m·h·°C). Aussi, on a réalisé de nouveaux types de briques d'une masse volumique et d'un coefficient de transmission thermique moins élevés. Ces matériaux de maçonnerie sont actuellement très employés dans le bâtiment. Pour les distinguer des briques ordinaires, on les appelle des matériaux céramiques efficaces ou spéciaux. Ils comprennent les briques poreuses, les briques percées, les briques creuses et les pierres de maçonnerie creuses.

Briques poreuses

On peut fabriquer les briques poreuses avec des argiles ordinaires auxquelles on ajoute des additions fusibles (sciure de bois, tourbe pulvérisée, charbon pulvérisé). On les fabrique également avec de la terre d'infusoires, ou un mélange d'argile et de terre d'infusoires.

Certaines briqueteries fabriquent des briques « d'infusoires » ayant une hauteur doublée (250 × 120 × 140 mm).

L'emploi de ces briques est avantageux, car il réduit le nombre des joints dans une maçonnerie.

Les briques à forte porosité doivent résister au gel dans les cas où on les met en œuvre pour les murs extérieurs des bâtiments.

Ces briques sont essayées à la réception de la même façon que les briques ordinaires. On procède simplement à un essai supplémentaire ayant pour but de montrer que la résistance mécanique de la brique ne diminue pas après son immersion dans l'eau.

La conduction d'une brique poreuse diminue avec la diminution de sa masse volumique.

L'emploi des briques poreuses permet de réduire l'épaisseur des murs extérieurs, ce qui réduit les dépenses de main-d'œuvre, de transport, et donc du prix des murs.

Cependant, la résistance mécanique d'une brique poreuse étant relativement faible, ces briques ne peuvent pas servir à construire des murs supportant de fortes charges.

Briques d'argile creuses à moulage plastique

On fabrique les briques creuses par moulage avec de l'argile qui peut ou non contenir des additions fusibles et amaigrissantes.

La masse argileuse doit être travaillée plus soigneusement dans la fabrication des briques creuses que dans la fabrication des briques ordinaires. Il est bon de mouler les briques creuses dans des presses à vide, munies de poinçons servant à réaliser les conduits. Les poinçons sont portés par un peigne métallique et placés à l'intérieur de la filière (c'est-à-dire là où la barre d'argile sort de la presse).

Les conduits en nombre variable sont perpendiculaires au lit.

Selon la norme soviétique, les briques creuses sont classées en quatre qualités ou marques, d'après la charge de rupture à la compression et à la flexion rapportée à la section brute (c'est-à-dire sans défalquer la section des conduits) : 150 ; 125 ; 100 ; 75 (voir tableau 7).

Les parements des briques peuvent être lisses ou striés. Les dimensions de la brique courante sont 250 × 120 × 88 ou bien × 65 mm, et celles de la grande brique 250 × × 120 × 103 mm.

Tableau 7

Charges de rupture des briques d'argile creuses, rapportées à la section brute, kg/cm², au moins

Qualité ou marque	A la compression		A la flexion	
	moyenne de 5 échantillons	minimale pour un échantillon	moyenne de 5 échantillons	minimale pour un échantillon
150	150	125	20	10
125	125	100	18	9
100	100	75	15	8
75	75	50	14	7

On divise d'autre part les briques en deux classes d'après la masse volumique brute, après séchage jusqu'au poids constant :

classe A : masse volumique inférieure ou égale à 1 300 kg/m³;

classe B : masse volumique supérieure à 1 300 kg/m³, mais ne dépassant pas 1 450 kg/m³.

La capacité d'absorption d'eau d'une brique ne doit pas être inférieure à 6% de son poids à l'état absolument sec. En ce qui concerne la résistance au gel, les briques creuses doivent satisfaire aux mêmes conditions que les briques ordinaires.

On emploie les briques creuses dans les maçonneries, en conformité avec les normes et spécifications techniques en vigueur. On les emploie principalement pour construire les murs des maisons de peu d'étages, et pour le remplissage des bâtiments à ossature métallique.

Briques d'argile creuses comprimées par voie demi-humide

Les briques creuses qui comportent au moins quatre conduits non débouchants sont fabriquées par voie demi-humide (fig. 35).

Ces briques doivent avoir les dimensions suivantes : 250 × 120 × 88 ou bien 65 mm.

On les fabrique avec des conduits débouchants ou non perpendiculaires aux lits. On produit des briques à 8 et

18 conduits dont les diamètres respectifs sont de 35-45 mm et de 17-18 mm.

La masse volumique de la brique brute ne doit pas dépasser 1 500 kg/m³ après son séchage jusqu'au poids constant.

La norme soviétique classe les briques creuses en quatre qualités ou marques : 150, 125, 100 et 75. Pour déterminer la charge de rupture à la compression, on emploie des échantillons constitués par deux briques, que l'on essaie à plat, les conduits étant tournés vers le bas

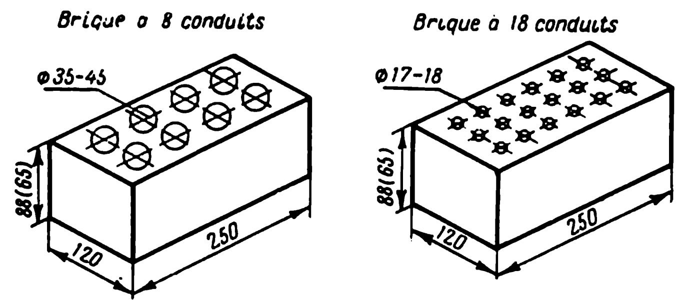


Fig. 35. Briques creuses comprimées par voie demi-humide

La capacité d'absorption d'eau d'une brique creuse ne doit pas être inférieure à 8% du poids de cette brique. La résistance à la flexion est de 20, 18, 16 ou 14 kg/cm², selon la qualité. Toutes les autres prescriptions techniques imposées aux briques creuses sont les mêmes que pour les briques ordinaires.

De même que les briques ordinaires, les briques creuses sont employées pour la maçonnerie des murs, des cloisons, et pour constituer des blocs et panneaux préfabriqués.

Pierres céramiques creuses fabriquées par pressage à l'état plastique pour murs

On fabrique les pierres creuses par pressage suivi d'une cuisson, avec de l'argile comportant ou non des produits d'addition.

La méthode de production des pierres creuses est analogue à celle de production des briques creuses. Dans de nombreuses fabriques récemment construites, on traite la pâte à sec, après avoir, au préalable, séché, broyé et humec-

té d'eau l'argile. Les pierres fabriquées avec diverses argiles facilement fusibles sont moulées dans des presses sous vide, avec un vide d'au moins 700 mm Hg.

Selon la charge de rupture à la compression rapportée à la section brute (c'est-à-dire, sans défalquer les vides), on classe les pierres céramiques en quatre qualités : 150, 100, 75 et 50.

On donne aux pierres la forme d'un parallélépipède rectangle, à arêtes vives et à faces lisses ou ondulées. Les conduits sont débouchants ou non et sont perpendiculaires aux arêtes.

La masse volumique brute des pierres ne doit pas être supérieure à 1 400 kg/m^3.

La capacité d'absorption d'eau ne doit pas être inférieure à 6%. En ce qui concerne la résistance au gel, les pierres doivent satisfaire aux mêmes conditions que les briques ordinaires.

On utilise les pierres creuses pour la maçonnerie des murs portants, comme remplissage des ossatures, ainsi que pour les murs intérieurs et les cloisons.

La figure 36 représente divers types de pierres céramiques creuses.

Actuellement, on utilise de moins en moins les différents types de briques (briques pleines ou non) pour les murs des bâtiments, du fait que ce matériau demande une grande main-d'œuvre. On remplace le maçonnage traditionnel par le montage de grands blocs de briques ou de panneaux vibrés fabriqués en usine. Une telle mise en œuvre de la brique permet d'accélérer la construction des murs des bâtiments.

Les *panneaux vibrés en briques* sont des éléments de grandes dimensions confectionnés avec de la brique rouge ou de silicate sur mortier de ciment et d'un calorifuge. Pour obtenir un élément monolithique, on interpose un grillage d'armature entre les briques.

Le calorifuge employé dans ces panneaux peut être constitué par des plaques de laine minérale, du verre mousse, de la fibrolite, etc.

La méthode de production des panneaux vibrés en briques comprend les opérations suivantes : préparation du mortier et de l'ossature métallique, moulage des panneaux, traitement vibratoire et finition des panneaux, prise des panneaux dans des chambres d'étuvage.

Les panneaux destinés aux murs extérieurs peuvent être à une couche ou à deux couches (à une épaisseur ou à deux épaisseurs).

Les panneaux de briques à deux couches et le calorifuge peuvent être revêtus de carreaux céramiques (fig. 37). L'épaisseur totale d'un panneau est de 260 mm, dont 120 mm de briques, 100 mm de verre mousse, 4 mm de carreaux céramiques et trois couches de mortier, soit de 36 mm. Dimensions d'un panneau : 2 670 × 3 180×260 mm.

On fabrique les panneaux à une couche avec des pierres céramiques à gros conduits. L'épaisseur totale d'un panneau est de 300 mm, dont

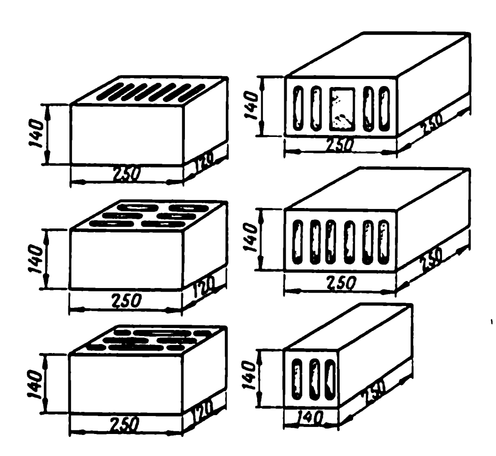
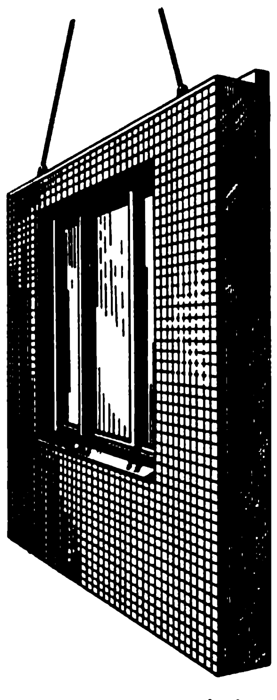


Fig. 36. Pierres céramiques creuses


Fig. 37. Panneau vibré en briques (vue d'ensemble)

250 mm de pierre céramique, 25 mm d'agrégat en béton de kéramsite et 25 mm de mortier. Dimensions d'un panneau : 2 750 × 3 190 × 300 mm.

Les panneaux pour murs intérieurs sont confectionnés en briques et renforcés par des carcasses métalliques spéciales. Epaisseur totale d'un panneau 140 mm. Cette épaisseur est constituée par une couche de mortier de 10 mm sur chaque côté de la brique de 120 mm. Dimensions des panneaux de cloisons : 2 620 × 2 270 × 140 mm.

Un panneau vibré en briques pèse en moyenne 2,0 tonnes.

La fabrication des panneaux vibrés en briques est avantageuse dans les régions où l'on ne fabrique pas encore des panneaux de béton armé en grande série, et où il existe des briqueteries. Comparativement aux murs construits en briques, l'emploi des panneaux vibrés préfabriqués en briques présente l'avantage d'une mécanisation plus poussée dans le montage des murs et permet des économies importantes sur les matériaux de construction des murs.

§ 3. TUILES EN ARGILE

On emploie les tuiles pour couvrir les pentes et les faîtages des toits.

Les tuiles peuvent faire concurrence avec succès à tous les autres matériaux de toiture au point de vue économie, durée et qualités architecturales.

Les quatre types de tuiles les plus courants sont les suivants : tuiles fabriquées par étampage (fig. 38), tuiles plates à emboîtement, tuiles plates ordinaires (fig. 39) et tuiles de faîtage (fig. 40).

On fabrique les tuiles avec une argile plastique. Avant de procéder au moulage, on travaille l'argile soigneusement, pour détruire sa texture naturelle, faire disparaître les inclusions de matières étrangères et pour accroître sa plasticité.

On développe de plus en plus actuellement la fabrication mécanisée des tuiles pressées. On produit ces tuiles dans des moules en métal ou en plâtre, dans des presses révolvers (fig. 41) ou des presses à glissière (fig. 42). Pour former les tuiles plates, on peut employer des presses spéciales, mais on peut également employer d'autres presses produisant une bande continue de matière. On sectionne cette bande à la longueur voulue, on sèche les éléments et on les soumet ensuite à la cuisson.

Les tuiles doivent être plates et être exemptes de fissures. Leur forme et leurs cotes doivent être conformes au plan, compte tenu des tolérances. La flèche maximale tolérée sur les nervures est de 4 mm.

Sous le choc d'un marteau, une tuile, quel que soit son type, ne doit rendre ni un son sourd ni un son fêlé. Un tel son résulterait d'une fissuration ou d'une mauvaise cuisson.

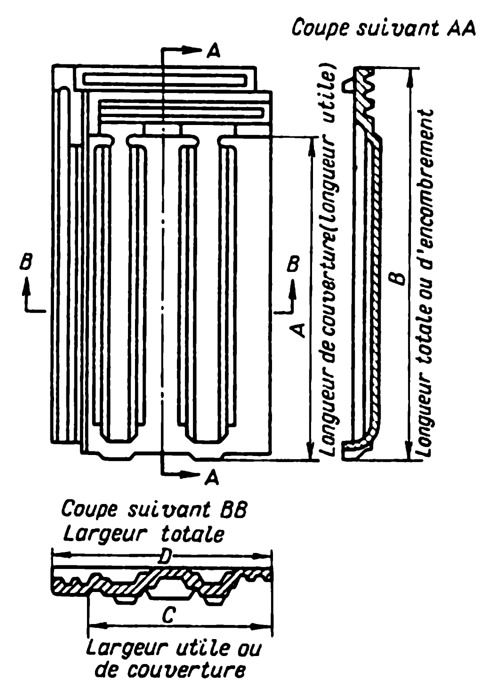


Fig 38. Tuile fabriquée par étampage

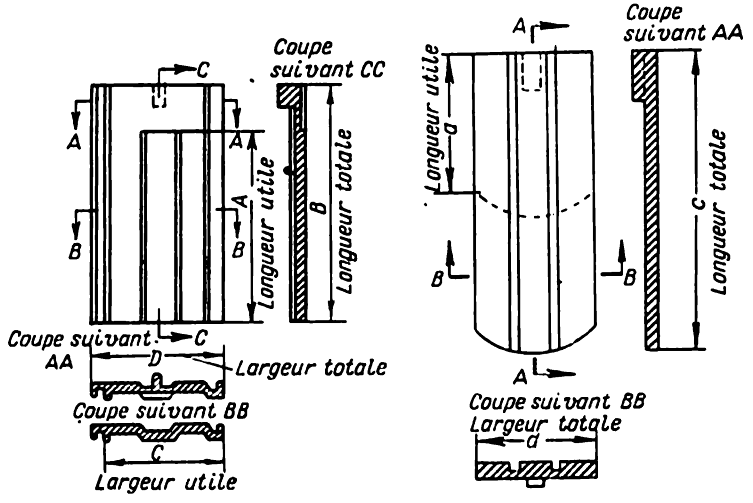


Fig. 39. Tuile plate à emboîtement (à gauche) et tuile plate ordinaire (à droite)

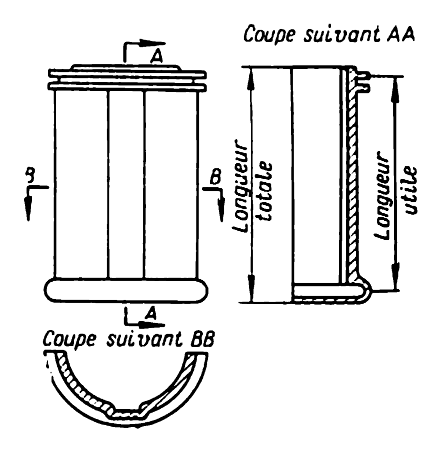


Fig. 40. Tuile de faîtage

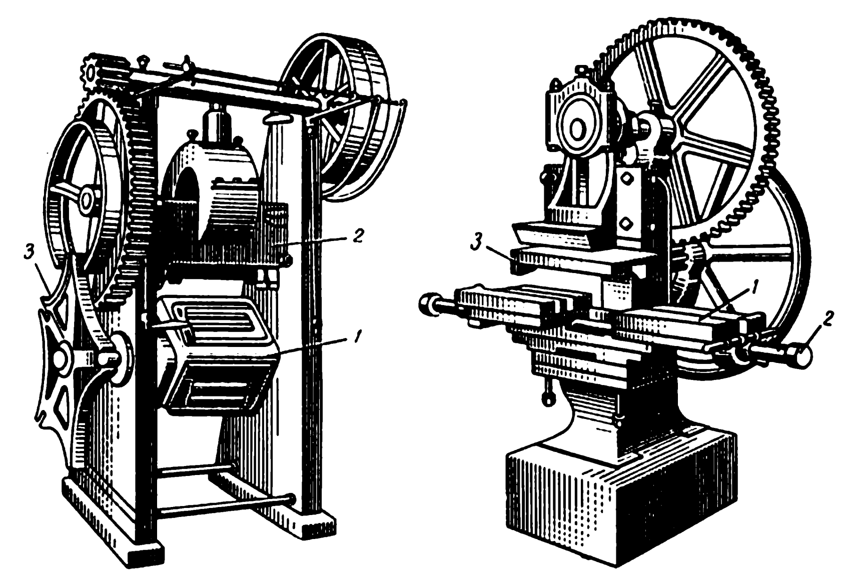


Fig. 41. Presse révolver pour formage des tuiles :
1 — tambour ; 2 — étampe ; 3 — pignon

Fig. 42. Presse à glissière pour formage des tuiles :
1 — formes ; 2 — barre de serrage ; 3 — poinçon

A l'essai de flexion, une tuile normale séchée à l'air doit supporter une charge d'au moins 70 kg. Saturée d'eau, elle doit pouvoir supporter 25 gels et dégels consécutifs à une température de —15 °C.

La profondeur des gorges ne doit pas être inférieure à 5 mm. La hauteur du rebord d'accrochage doit être d'au moins 10 mm dans une tuile fabriquée à la presse, et d'au moins 20 mm dans une tuile plate.

Sur sa face inférieure, chaque tuile doit comporter un œillet servant à fixer la tuile aux lattes.

Les tuiles sont posées sur les lattes et accrochées par leurs rebords. La pente minimale admise pour une toiture en tuiles est de 30°.

§ 4. REVÊTEMENTS

a) Revêtements extérieurs

Les produits céramiques satisfont à toutes les conditions essentielles que l'on exige des matériaux devant être employés pour les revêtements extérieurs. C'est pour cette raison que leur emploi est si largement répandu actuellement dans le bâtiment.

On sait que les murs des immeubles sont soumis à l'action des précipitations atmosphériques. Or, l'humidité d'un mur accroît sa conductivité thermique, ce qui nuit aux conditions d'utilisation des locaux. Les revêtements doivent donc être imperméables à l'eau et empêcher l'eau de pénétrer dans le matériau constituant la masse même du mur, par exemple, dans la maçonnerie en briques.

Les revêtements subissent fréquemment des périodes de gel et de dégel alors qu'ils sont humides. Cela se produit surtout au printemps et en automne.

L'action conjuguée de l'eau et de la gelée constitue l'action extérieure la plus dangereuse pour les revêtements extérieurs. Dans les pays du Nord, ces revêtements doivent donc bien résister à la gelée et supporter sans aucune détérioration de nombreux cycles de gel et de dégel lorsqu'ils sont saturés d'eau.

Les revêtements peuvent avoir à subir des actions mécaniques (chocs, compression). Pour faire face à ces actions, ils doivent avoir une résistance mécanique élevée.

En outre, les revêtements doivent avoir une couleur agréable ne s'altérant pas avec le temps et une forme régulière.

Une fixation simple et une mise en œuvre aisée sont les qualités fondamentales que doivent posséder les revêtements.

Briques et pierres céramiques de parement

Actuellement, les briques et pierres céramiques de parement sont les matériaux céramiques les plus employés pour les façades des immeubles, les divers types de plaques céramiques précédemment employés n'ayant pas donné satisfaction parce qu'ils demandaient trop de main-d'œuvre, et que leur fixation au mur était compliquée et peu sûre.

Tableau 8

Type de brique ou pierre	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
Brique	250	120	65 ou 90
Pierre	250	120	140
Pierre 3/4	185	120	140

Les briques et pierres de parement céramiques pleines ou creuses confectionnées en argile (avec ou sans additions) et cuites ensuite, sont employées pour les revêtements des façades des immeubles, des murs intérieurs des halls, des cages d'escaliers et des dégagements. Il est à souligner que le revêtement et la maçonnerie des bâtiments en pierres s'élèvent en même temps.

D'après la forme et l'emploi auxquels elles sont destinées, on classe les briques et pierres de parement céramiques en briques et pierres ordinaires et briques et pierres profilées.

Les dimensions des pièces ordinaires doivent être conformes à celles du tableau 8 (en mm).

On fabrique dix types différents de pièces profilées destinées aux revêtements des bâtiments.

Les tolérances sur les dimensions des briques et des pierres ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes :

pour les dimensions entre 185 et 250 mm : ± 4 mm ;
pour les dimensions entre 120 et 140 mm : ±3 mm ;
pour les dimensions entre 65 et 90 mm : +3 mm et —2 mm.

Les briques de parement et les pierres sont classées en quatre qualités ou marques, les premières en fonction de leur charge de rupture à la compression et à la flexion, et les deuxièmes en fonction de leur charge de rupture à la compression. Ces qualités sont : 150, 125, 100 et 75.

Les parements des briques et des pierres peuvent être lisses, têtus ou bien rustiqués.

Les briques et pierres de parement de tous types doivent avoir des arêtes vives, des parements plans sans courbures, ne comporter aucune cassure aux angles ou aux arêtes, ni aucun autre défaut.

La capacité d'absorption d'eau des pierres et des briques ne doit pas être inférieure à 6% ; elle ne doit pas dépasser 12% pour les briques et pierres en argile cuite à blanc, et 14% pour les autres argiles.

Ces pièces doivent pouvoir résister à au moins 25 cycles de gel et de dégel.

On admet quelques écarts par rapport à la norme dans l'aspect extérieur des briques et pierres, en particulier de très légers défauts d'orthogonalité, une légère courbure du parement et des arêtes, des angles émoussés. Par contre, on n'admet ni fissures ni décolorations ou taches du parement visibles à une distance de 10 m.

Les briques et les pierres doivent être entreposées en cage sur cales de bois par types, marques ou qualités, et couleurs des parements.

Les briques et pierres à conduits non débouchants sont entreposées, leurs conduits tournés vers le bas. Pour les transporter en wagons ou en camions, il faut les empiler régulièrement, en interposant des paillasses entre chaque rangée.

Il est interdit de charger les briques et les pierres en vrac.

b) Revêtements intérieurs

Les matériaux destinés aux revêtements intérieurs des locaux doivent satisfaire à des exigences quelque peu différentes, qui dépendent des conditions de leur emploi. Ces matériaux n'ont pas à supporter, par exemple, des tempé-

ratures négatives ; on ne leur demande donc pas de résister au gel. Par contre, on attache une importance particulière à l'exactitude des dimensions, à la régularité de formes et à l'uniformité de couleur. Chaque détail étant visible dans un revêtement intérieur, on impose des conditions plus sévères à l'aspect des matériaux employés.

Les matériaux des revêtements intérieurs doivent être imperméables à l'eau, résister au feu, être suffisamment solides ; de plus, les matériaux employés pour les sols doivent être particulièrement résistant au choc et à l'usure par frottement.

Les carreaux céramiques sont largement mis en œuvre dans les revêtements des salles de bains, des cabinets de toilette, des cuisines, des établissements de bains, des buanderies, des salles d'hôpitaux, etc. Ils ont pratiquement éliminé tous les autres matériaux de revêtement et de protection aux endroits fortement exposés à l'humidité. Les carreaux céramiques de revêtement sont des plaques de formes carrée ou courbe fabriquées avec une argile ou une pâte céramique additionnée de fondants et recouvertes d'émail. La face arrière est striée, ce qui donne une plus grande adhérence au ciment.

D'après la compacité de la masse, on classe les carreaux céramiques en carreaux de grès, de porcelaine et de faïence. Les carreaux de grès sont obtenus par moulage d'une argile naturelle. Aussi, leur couleur et leur consistance sont celles de la brique ordinaire. Les carreaux en faïence et en porcelaine sont généralement fabriqués avec des pâtes additionnées de fondants (argiles et kaolins réfractaires se cuisant à blanc), de quartz, de feldspath, etc.

La porcelaine se distingue de la faïence par un corps plus compact et plus translucide. Sa capacité d'absorption d'eau est très faible de l'ordre de 0,5%, alors que celle de la faïence est de l'ordre de 10 à 15%. On emploie actuellement les carreaux de faïence.

On peut également différencier les carreaux par leur transparence ou leur opacité et la couleur de leur émail.

A travers une couche brillante d'émail transparent, on distingue la couleur du corps du carreau. Un émail opaque et masquant la couleur de la masse peut avoir les couleurs les plus diverses, du blanc jusqu'au noir.

Les carreaux de revêtement peuvent être lisses, rugueux, plans ou courbes. Les carreaux courbes sont employés pour

les angles des locaux, les plinthes, les embrasures des fenêtres et les corniches.

Les carreaux pour revêtements intérieurs fabriqués par les usines céramiques doivent avoir une forme et des dimensions rigoureusement fixées. La norme en vigueur prévoit 11 types différents de carreaux.

La figure 43 indique les désignations, les formes et les dimensions des divers carreaux. Les carreaux *5* (*6*) et *7* (*8*) ne se distinguent que par leurs dimensions. Les carreaux *1*

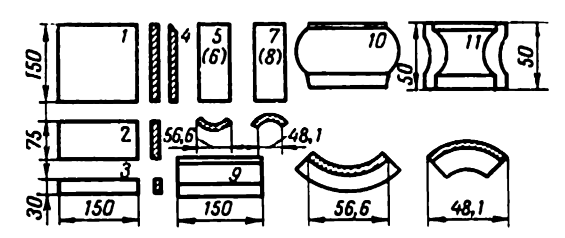


Fig. 43. Carreaux céramiques pour revêtements intérieurs :

1 — carreaux carrés ; *2* — demi-carreaux (rectangulaires) ; *3* — carreaux étroits ; *4* — carreaux carrés à arête arrondie ; *5* et *6*, *7* et *8* — carreaux courbes ; *9* — carreaux courbes pour corniches ; *10* — corniche pour angle sortant ; *11* — corniche pour angle entrant

et *4* diffèrent en ce que les arêtes du carreau *1* sont à angle droit, alors que l'une des arêtes du carreau *4* est arrondie.

Malgré toute la diversité des dimensions des carreaux et des pièces courbes, leur épaisseur ne doit jamais dépasser 6 mm. On tolère à la rigueur des carreaux d'une épaisseur atteignant 12 mm, s'ils sont fabriqués en une argile à brique.

La tolérance sur la longueur des côtés des carreaux ne doit pas excéder 1,5 mm, aussi bien par excès que par défaut. De plus, les écarts doivent toujours être dans le même sens dans un lot de carreaux (soit par excès, soit seulement par défaut).

Ceci exige un triage rigoureux des carreaux en usine, pour constituer les lots.

Les carreaux rectangulaires et carrés doivent avoir une forme géométrique régulière. La tolérance sur les côtés d'un angle droit ne doit pas excéder 0,5 mm. Ces impératifs s'expliquent par la nécessité d'obtenir des revêtements avec des joints égaux et d'une épaisseur minimale. Des joints

d'épaisseurs variables réduisent en effet la qualité du revêtement et sa durée et nuisent à son aspect extérieur.

L'écart de planéité des faces des carreaux ne doit pas excéder 1,5 mm. Le parement des carreaux doit être uniformément recouvert d'émail, ne doit comporter ni bulles gazeuses, ni lacunes, ni traces d'écoulement, ni des régions d'épaisseur excessive, ni des réseaux de craquellement. La présence de carreaux de couleurs différentes dans un même lot n'est pas tolérée.

On classe les carreaux en deux sortes d'après leur aspect extérieur et d'après la qualité de la couverture d'émail.

En plus des exigences précédentes, caractérisant surtout les qualités décoratives, on impose également aux carreaux des impératifs concernant les qualités pratiques d'utilisation. Parmi celles-ci, il faut citer la résistance mécanique et la résistance à la chaleur. Un carreau doit avoir une résistance suffisante aux chocs : sans être détruit, il doit pouvoir supporter quatre coups d'une bille en acier de 110 à 115 g tombant d'abord d'une hauteur de 125 mm, la hauteur de chute étant ensuite majorée chaque fois de 25 mm.

La température subit des fluctuations considérables dans les salles de bain, les cuisines et les établissements de bains, ce qui peut fissurer les carreaux et effriter l'émail. Pour contrôler la qualité des carreaux à ce point de vue, on détermine leur résistance à la chaleur en les chauffant jusqu'à 100 °C et en les refroidissant ensuite subitement dans de l'eau à 18-20 °C. A la suite d'un tel essai, l'émail doit rester absolument intact.

La capacité d'absorption d'eau, un des indices déterminant la qualité des carreaux, ne doit pas excéder 16%. Cette capacité d'absorption caractérise les masses ayant une compacité assez élevée.

L'homogénéité et la compacité de la masse sont les facteurs déterminants de la qualité des carreaux. On obtient une bonne homogénéité et une bonne compacité en comprimant fortement les carreaux lors du moulage. Dans ce but, la poudre du mélange est comprimée dans des moules en acier sous une pression de 140 à 160 kg/cm^2, ce qui assure en outre des dimensions précises et une forme régulière des carreaux. On emploie actuellement des presses automatiques pouvant produire 2 500 carreaux par heure.

A la sortie de la presse, les carreaux passent dans une ébarbeuse, puis dans un séchoir à fonctionnement continu

et à transporteur. La couche d'émail crue est appliquée sur les carreaux par des appareils automatiques spéciaux.

Les carreaux sont soumis à la cuisson dans des fours à fonctionnement périodique ou à fonctionnement continu (fours-tunnels). Dans ce but, on place les carreaux dans des caissons ou tiroirs spéciaux en matière céramique pour qu'ils ne subissent pas directement l'action brutale des températures élevées.

Après cuisson, les carreaux sont classés par dimensions, couleur, type et qualité, et on les emballe dans de robustes caisses en bois à claire-voie.

c) Produits céramiques pour sols

Les sols en carreaux céramiques trouvent leur application dans les vestibules des édifices publics, dans les établissements de bains, les buanderies, dans les salles d'eau (c'est-à-dire dans les locaux qui sont toujours humides ou exposés à une forte usure). On les emploie également dans les locaux qui doivent satisfaire à des conditions d'hygiène sévères et dans de nombreux locaux des entreprises chimiques.

Les produits céramiques sont imperméables à l'eau. Ils protègent efficacement les structures portantes des planchers contre l'humidité, résistent bien à l'usure par abrasion, ne produisent pas de poussière, sont faciles à laver, ne s'imprègnent pas d'humidité, et de plus résistent bien aux acides et aux alcalis.

A côté des avantages énumérés, les sols en carreaux céramiques ont certains inconvénients. Ils sont dans une certaine mesure fragiles et très bons conducteurs de chaleur. Aussi, on ne peut pas les adopter dans les locaux d'habitation sans les recouvrir par de tapis, de linoléum ou d'autres matières protégeant contre le froid. En outre, la pose des sols en carreaux céramiques de petites dimensions demande beaucoup de main-d'œuvre. Ces inconvénients ne sont pas toutefois essentiels et les carreaux céramiques trouvent une large application dans les immeubles d'habitation, les édifices publics et les bâtiments industriels.

On distingue deux catégories de produits céramiques pour sols : les carreaux pour sols et les carrelages en mosaïque.

On fabrique 15 types de carreaux pour sols (fig. 44) qui se distinguent soit par la forme et les dimensions, soit uniquement par les dimensions (carrés, rectangulaires, triangulaires, hexagonaux, octogonaux, moitiés).

On fabrique six types différents de carrelages en mosaïque. Dans cette catégorie, les petits carreaux de forme carrée ont 23 × 23 × 6 mm ; 48 × 48 × 6 mm ; 23 × 23 × 8 mm et 28 × 28 × 8 mm et les petits carreaux rectangulaires 48 × 23 × 6 mm et 28 × 23 × 8 mm

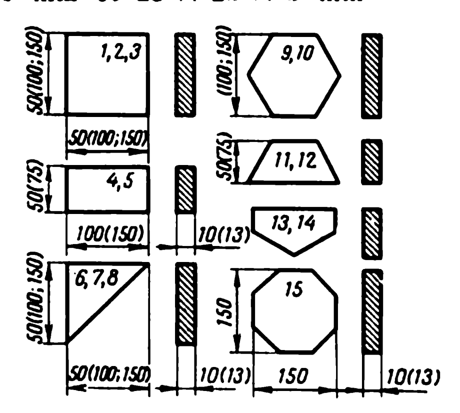


Fig. 44. Carreaux céramiques pour sols :
1 à *3* — carrés ; *4* et *5* — rectangulaires (moitiés) ; *6* à *8* — triangulaires ; *9* et *10* — hexagonaux ; *11* à *14* — moitiés hexagonales ; *15* — octogonaux. Les carreaux *3*, *5*, *8*, *10*, *12*, *14* et *15* ont une épaisseur de 13 mm

Les carreaux peuvent avoir les couleurs les plus diverses. Le plus souvent, ils sont blancs, rouges ou jaunes, ces couleurs pouvant être combinées de diverses façons.

La face arrière des carreaux est toujours striée, pour assurer une bonne adhérence au mortier posé sur la chape. La face de parement peut être lisse ou striée. On l'adopte striée pour les sols des locaux à forte humidité (par exemple, établissements de bains, buanderies, etc.), afin de réduire le risque de glissade. Les carreaux pour sols doivent essentiellement satisfaire aux impératifs sur les dimensions prescrites, la correction de la forme, la qualité de la face de parement, l'hygroscopicité et la résistance à l'usure.

La capacité d'absorption d'eau des carreaux pour sols ne doit pas dépasser 4% du poids des carreaux séchés jusqu'à un poids constant.

On exprime la résistance d'un carreau à l'abrasion par la diminution du poids de ce carreau sous l'action abrasive d'une meule après une course de 150 m. Cette réduction de poids ne doit pas excéder 0,1 g/cm².

La capacité d'absorption d'eau et la perte de poids par abrasion ne doivent pas excéder les valeurs suivantes pour les carrelages en mosaïque : 1% et 0,1 g/cm² pour la qualité A, et 4% et 0,25 g/cm² pour la qualité B.

Les carreaux sont moulés avec un mélange pulvérulent dans des presses hydrauliques ou mécaniques sous une pression de 250 à 300 kg/cm². Une telle pression est nécessaire pour donner aux carreaux un corps compact. Actuellement, la plupart des fabriques emploient des presses hydrauliques semi-automatiques ou des presses mécaniques automatiques.

Avant de subir une cuisson jusqu'à 1 200 ou 1 300 °C, le carreau sorti de la presse est généralement séché jusqu'au degré hydrométrique inférieur à 3%, ce qui améliore considérablement la qualité du carreau après cuisson.

Après cuisson, les carreaux sont soigneusement classés par qualités, dimensions, couleurs et teintes, puis emballés par paquets de 15. Dans ces paquets, 14 carreaux sont enveloppés dans un papier fort, le quinzième étant placé sa face de parement tournée vers l'extérieur. Le tout est ensuite ficelé.

Pour accélérer et faciliter la mise en place d'un carrelage en mosaïque, on colle les carreaux sur un papier fort de 398 × 598 mm. Ensuite, on compose ces feuilles de carrelage suivant le dessin prévu. Les feuilles garnies de carreaux sont emballées par paquets de 10.

§ 5. TUYAUX ET PIÈCES POUR SANITAIRE EN CÉRAMIQUE

a) Tuyaux pour canalisations

Ces tuyaux, dont le diamètre peut varier de 125 à 600 mm, ont un corps très compact et sont glacés extérieurement et intérieurement.

La matière première principalement employée dans la fabrication des tuyaux est une argile plastique, peu collante, très réfractaire ou au moins difficilement fusible, additionnée de chamotte finement broyée et parfois de sable quartzeux.

On moule les tuyaux dans des presses spéciales pour tuyaux (fig. 45). Les tuyaux pour canalisations sont moulés avec colliers et sont séchés à l'air libre ou en conditions artificielles.

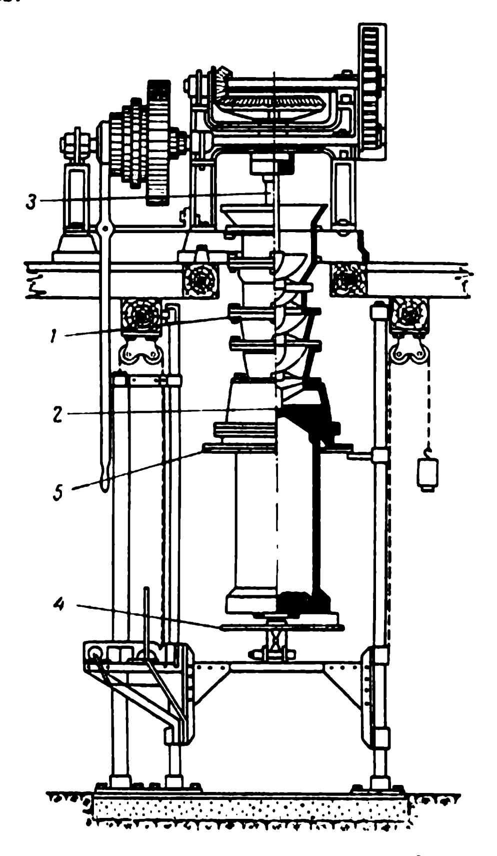


Fig. 45. Presse verticale à vis pour fabrication des tuyaux :

1 — cylindre de presse ; 2 — tête mandrin ; 3 — arbre ; 4 — plateau récepteur ; 5 — découpeur

Les tuyaux une fois façonnés et séchés sont glacés, puis soumis à la cuisson dans des fours ordinaires ou des fours-tunnels.

On distingue deux qualités de tuyaux d'après leur aspect extérieur.

Les tuyaux doivent satisfaire aux prescriptions suivantes : supporter une pression hydraulique d'au moins 2 atmosphères, avoir une résistance aux acides d'au moins 90% et une capacité d'absorption pondérale d'eau maximale de 9% pour la première qualité et de 11% pour la deuxième qualité.

Les tuyaux céramiques présentent des avantages importants, inestimables au point de vue technique : ils ont une résistance élevée à l'égard des eaux agressives ; on peut les fabriquer avec des matières premières locales ; ils sont insensibles aux courants électriques vagabonds.

b) Pièces céramiques pour sanitaire

On distingue trois groupes de pièces céramiques pour sanitaire :

1) les pièces en faïence dure, dont la masse est poreuse ;

2) les pièces en porcelaine sanitaire, dont la masse est compacte ;

3) les pièces en demi-porcelaine, dont la masse a une compacité intermédiaire.

On fabrique les faïences, les demi-porcelaines et les porcelaines à l'aide des mêmes matières premières, mais les proportions des diverses matières premières varient d'un groupe à l'autre (voir tableau 9).

Tableau 9

Composition de la pâte des pièces céramiques pour sanitaire

Matières premières	Pourcentages pondéraux		
	Faïence dure	Demi-porcelaine	Porcelaine sanitaire
Matières argileuses (argiles et kaolins réfractaires, cuits à blanc)	50-55	48-50	45-50
Quartz	40-50	40-45	30-35
Feldspath	5-10	7-12	18-22

Les pièces céramiques pour sanitaire doivent satisfaire à des impératifs sévères concernant la résistance mécanique, la résistance à la chaleur, sans parler de diverses proprié-

tés imposées par chaque application particulière. Pour que les produits satisfassent à de telles prescriptions, il faut les fabriquer avec des matières premières d'excellente qualité et se conformer rigoureusement aux méthodes de production, qui sont en principe analogues pour les trois groupes de produits.

Les faïences dures ont une cassure blanche et poreuse et sont revêtues d'une glaçure opaque ou transparente. Une masse de faïence non glacée est perméable à l'eau.

En Union Soviétique, le matériel sanitaire est actuellement surtout fabriqué en faïence dure (cuvettes, lavabos, bacs).

La demi-porcelaine possède des qualités plus élevées au point de vue hygiénique, sanitaire et mécanique ; elle occupe une place intermédiaire entre la faïence dure et la porcelaine.

La porcelaine a une cassure blanche, compacte et vitreuse. Elle est imperméable à l'eau et au gaz, a une résistance mécanique élevée et de même une résistance élevée à la chaleur et aux agents chimiques.

Les matières premières servant à fabriquer les pièces sanitaires sont soumises au broyage, à l'amaigrissement, au criblage et à d'autres opérations assurant l'homogénéité et la finesse des matières. Après ces opérations mécaniques, on les mélange avec de l'eau pour obtenir une pâte fluide.

Actuellement, on moule les pièces sanitaires de préférence par coulée dans des moules en plâtre. Après absorption de l'excédent d'eau par le plâtre, on extrait les pièces, on les sèche, on les ébarbe et l'on termine le séchage dans une étuve jusqu'à une humidité relative de 1 ou 2%.

Après séchage et glaçage, les pièces subissent une cuisson à 1 250-1 300 °C. Cette cuisson se fait dans des fours à fonctionnement continu ou discontinu, à l'intérieur des caissons ou tiroirs.

On fabrique les baignoires en faïence avec une faïence de haute qualité que l'on recouvre avec des émaux de diverses couleurs. Ces baignoires ont une forme rectangulaire, un fond plat, des parois creuses qui se terminent en bas par des nervures creuses, réunies par deux transverses servant de support à la baignoire.

Les baignoires en faïence se distinguent des baignoires en fonte émaillée par leur forme esthétique, la beauté de

leur émail, par une qualité hygiénique supérieure et par une faible conductivité thermique.

Le tableau 10 énumère les caractéristiques des diverses pièces pour sanitaire.

Tableau 10

Caractéristiques physiques et mécaniques des pièces céramiques pour sanitaire

Caractéristique	Faïence dure sanitaire	Demi-porcelaine sanitaire	Porcelaine sanitaire
Absorption d'eau, % . . .	10-12	3-5	0,2-0,5
Masse volumique, g/cm³ . . .	1,92-1,96	2,00-2,20	2,25-2,30
Résistance à la compression, kg/cm²	1000	1500-2000	5000
Résistance à la flexion, kg/cm²	150-300	380-430	700-800

Les pièces de bonne qualité ont une forme régulière, sans voiles ou dépressions et ont une surface unie, lisse et nette. Elles sont bien cuites et rendent un son clair sous le choc du marteau.

La glaçure recouvre la pièce d'une façon très uniforme et sans lacunes.

Sans aucune détérioration visible de la glaçure, les pièces peuvent supporter trois chauffages successifs à 100 °C, suivis par des refroidissements jusqu'à 15 °C (par immersion brusque dans l'eau).

La couleur de ces pièces est blanche, une nuance jaunâtre uniforme étant toutefois tolérée.

§ 6. MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES

On emploie les matériaux de construction réfractaires dans la maçonnerie de diverses parties de fours ou foyers industriels dont la température peut varier entre 1 000 et 1 750 °C.

Nous distinguerons les catégories suivantes de matériaux réfractaires :

matériaux simplement réfractaires, supportant des températures de 1 580 à 1 770 °C ;

matériaux très réfractaires, supportant des températures de 1 770 à 2 000 °C ;

matériaux parfaitement réfractaires, supportant des températures supérieures à 2 000 °C.

D'autre part, on distingue les groupes de matériaux réfractaires suivants, d'après leur composition chimique et minéralogique et d'après la méthode de production:

Matériaux siliceux		Aluminosilicates		
A	B	C	D	E
Silice réfractaire dinas	Verre quartzeux	Demi-acides	Du genre chamotte	Fortement alumineux

Matériaux magnésiens				Matériaux chromés		Matériaux carbonés	
F	G	H	I	J	K	L	M
Magnésites	Dolomites	Phostérites	Spinelles	Chromites	Chromomagnésites	Graphite	Cokes

Les *pièces siliceuses* du type dinas sont fabriquées par cuisson à partir de matériaux quartzeux (quartz, quartzite, sable quartzeux, marshallite, etc.) avec un liant de chaux ou autre. Ces pièces contiennent au moins 90% de silice pure, et résistent à une chaleur jusqu'à 1 690-1 730 °C. Leur résistance à la compression est de 150 à 350 kg/cm² et leur porosité de 20 à 25%.

Ces produits ont une mauvaise conductivité thermique au-dessous de 600 °C, et une bonne conductivité thermique aux températures plus élevées ; ils résistent mal aux scories. On les emploie pour maçonner les voûtes des fours industriels : fours de fusion d'acier (fours Martin ou électriques), de fusion de verre, etc.

On obtient le verre quartzeux par fusion du quartz. Ce verre résiste bien à la chaleur et a une résistance extrêmement élevée aux acides.

On fabrique les *pièces en aluminosilicate* avec des argiles et kaolins réfractaires amaigris par des matières quartzeuses ou une chamotte. On les fabrique également avec une matière première fortement argileuse, contenant plus de 45% d'alumine pure.

On fabrique les pièces semi-acides avec des roches quartzeuses et un liant en argile ou en kaolin, ou bien avec des argiles et des kaolins généralement amaigris avec du sable quartzeux. Ces produits résistent à une chaleur d'au moins 1 710° quand on emploie du kaolin et d'au moins 1 580° quand on emploie des argiles réfractaires. Les pièces demi-acides sont employées pour les revêtements intérieurs des fours à coke, les cubilots, etc.

On fabrique les pièces en chamotte avec des argiles ou kaolins réfractaires, amaigris par de la chamotte. On les divise en quatre classes, en fonction de leur résistance à la chaleur.

Les pièces à forte teneur d'alumine sont fabriquées à partir de minéraux naturels (bauxite, diaspore, corindon, etc.) ou bien avec des matériaux artificiels à forte teneur d'alumine. La proportion d'alumine pure ne dépasse pas 45% dans ces produits.

Les pièces à forte teneur d'alumine sont divisées en deux groupes d'après la méthode de production.

Les produits du premier groupe, appelés « céramiques à liant », sont fabriqués avec une matière première riche en alumine et un liant argileux ou autre.

Les produits du deuxième groupe, appelés « fondus et coulés », sont fabriqués avec du corindon et de la mullite, par fusion de matières riches en alumine.

La résistance de ces deux groupes à la chaleur varie de 1 820 à 1 960 °C, en fonction de la teneur en alumine ; leur stabilité thermique est faible, leur résistance à la formation de scories et de matières vitreuses est extrêmement élevée. On les emploie dans l'industrie du verre, pour les maçonneries de fours, etc.

Les produits appelés magnésiens sont constitués principalement par de la périclase (MgO) dont la teneur atteint généralement 80 à 85%. Ces produits résistent à une chaleur de plus de 2 000 °C.

Les produits dits en magnésite sont cuits jusqu'à agglutination ou fusion de la magnésite. Ils contiennent au moins 85% de périclase. Ils résistent à une chaleur de plus de 2 000 °C, et leur résistance à la compression varie de 300 à 500 kg/cm².

Les produits en dolomite contiennent les oxydes de calcium et de magnésium CaO et MgO, avec une proportion d'impuretés de 15 à 25%. Ils peuvent résister à une cha-

leur jusqu'à 1 780-1 800 °C et plus, et ont une résistance à la compression de 550 à 1 000 kg/cm^2.

Les produits dits en chromite sont fabriqués avec la chromite, avec addition de magnésite ou d'alumine. Ils résistent à une chaleur de 1 800-2 000 ° C et ont une très grande résistance contre l'action des scories basiques des minerais de fer. On les emploie dans les fours de fusion d'acier.

On fabrique les pièces carbonées à partir du carbone et de ses combinaisons.

On divise ces produits en produits graphités et en produits à base de coke. Ils possèdent une très grande résistance à la chaleur et à l'action des scories et métaux liquides. En milieu oxydé, le carbone de ces produits est transformé par combustion.

CHAPITRE V

LIANTS MINÉRAUX

Définition et classification

Les liants minéraux sont des substances finement pulvérisées qui peuvent former avec l'eau une pâte collante, qui durcit progressivement et qui prend la consistance de la pierre (exception : les liants magnésiens et les ciments résistant aux acides. Les premiers sont gâchés avec des solutions aqueuses de sels magnésiens, et les derniers avec le verre soluble ou liquide).

Le durcissement de la pâte de ciment, c'est-à-dire sa transformation en une matière analogue à la pierre, est le résultat de phénomènes physiques, chimiques et physico-chimiques qui se déroulent entre le liant et l'eau.

Dans les travaux de construction, on emploie les liants minéraux mélangés soit avec de l'eau, soit avec de l'eau et des agrégats, qui peuvent être du sable, du gravier ou de la pierraille. D'après leur composition, on distingue les mélanges suivants utilisés dans la construction :

pâte de ciment, qui est un mélange de liant et d'eau. (On peut appeler cette pierre, pierre de plâtre ou pierre de chaux suivant le liant qui est employé.) Après durcissement, la pâte de ciment est appelée pierre de ciment;

mortier de sable : mélange de liant, d'eau et d'agrégats fins (sable). Après durcissement, le mortier est appelé mortier de construction.

béton : mélange de liant, d'eau et d'agrégats fins et gros (sable et gravier ou pierraille). Après durcissement, le mélange de béton est appelé béton ; le béton comportant une armature en fer est appelé béton armé.

Classification. Certains liants minéraux possèdent des caractéristiques communes qui permettent de

les classer en plusieurs groupes. Il existe trois caractéristiques principales qui sont à la base de cette classification :

1) les propriétés du liant elles-mêmes et tout d'abord celles qui déterminent le domaine de son application ;

2) les matières premières employées pour obtenir le liant, et qui déterminent sa composition chimique ;

3) les caractéristiques technologiques de la fabrication, par exemple la température et la durée de la cuisson.

Les caractéristiques les plus importantes pour le constructeur sont les propriétés proprement dites du liant. On sait que certains liants durcissent seulement à l'air, tandis que d'autres peuvent durcir en un milieu humide, et même dans l'eau. D'après cette caractéristique, on classe les liants minéraux en liants aériens et en liants hydrauliques.

Les liants aériens ne peuvent durcir et conserver longtemps (ou bien augmenter) leur résistance mécanique qu'à l'air. Parmi les liants aériens, on peut citer la chaux aérienne et les liants plâtreux et magnésiens. En présence d'une humidité élevée, les liants aériens perdent complètement ou partiellement leur résistance mécanique.

Les liants hydrauliques peuvent acquérir, conserver ou augmenter leur résistance mécanique d'une façon prolongée, non seulement à l'air mais encore dans l'eau. Parmi les liants de cette catégorie, on peut citer la chaux hydraulique, le ciment Portland, le ciment alumineux, etc. Pouvant durcir à l'air et dans l'eau, les liants hydrauliques possèdent des caractéristiques permettant un emploi universel. Leur résistance mécanique est supérieure à celle des liants aériens. Aussi, les liants hydrauliques sont ceux employés de préférence dans la construction.

§ 1. LIANTS AÉRIENS

a) Liants plâtreux

Les liants plâtreux sont des produits finement pulvérisés obtenus par cuisson de la pierre à plâtre, qui est du sulfate de calcium bihydraté, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. D'après la température et les conditions d'exécution de la cuisson, on distingue le plâtre de construction, le plâtre à haute résistance et les ciments d'anhydrite.

Plâtre

Le plâtre est un produit finement pulvérisé que l'on obtient par cuisson de la pierre à plâtre à une température de 150 à 170°. A cette température, le sulfate de calcium bihydraté perd une partie de son eau d'hydratation et se transforme en sulfate semi-hydraté, par la réaction suivante :

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O = CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O.$$

Le sulfate de calcium semi-hydraté, $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$, caractérise en principe la composition chimique du plâtre.

La fabrication du plâtre consiste donc à transformer le plâtre naturel bihydraté en plâtre semi-hydraté.

F a b r i c a t i o n. On emploie trois procédés principaux pour fabriquer le plâtre. Ces procédés diffèrent par le matériel de chauffage dans lequel on effectue la cuisson : tambours de séchage, chaudières de cuisson et broyeurs verticaux.

Dans les tambours de séchage, on fait cuire des pierrailles ayant moins de 15 mm de grosseur, que l'on obtient par concassage de la pierre à plâtre. Ensuite, le produit cuit est pulvérisé dans des broyeurs à boulets ou dans des concasseurs à marteaux et délivré sur le chantier. Dans le procédé de cuisson du gypse en chaudières (fig. 46), on broie d'abord la pierre à plâtre jusqu'à obtenir une poudre ; ensuite, on la charge dans la chaudière et on la soumet à la cuisson pendant une heure et demie à deux heures, en brassant constamment. Après cuisson, la matière est déchargée par une ouverture spéciale aménagée dans la partie inférieure de la chaudière et livrée à l'usager après refroidissement.

Le troisième procédé prévoit la cuisson et le broyage simultanés du gypse dans un seul groupe. Ce procédé est la cuisson du gypse en suspension.

La cuisson se déroule dans un appareil spécial, le broyeur vertical (fig. 47). On alimente en continu le cylindre *1* du broyeur en pierre à plâtre sous forme des pierrailles qui tombent sur les marteaux en acier *2* tournant à grande vitesse. Les gaz de chauffage sont refoulés dans la partie inférieure du broyeur, c'est-à-dire sous les marteaux *2* par les canaux *3*.

Les fines particules obtenues au broyage sont entraînées hors du broyeur par les gaz chauds et déposées dans des collecteurs de poussière. Durant ce transport dans le cou-

rant de gaz chaud, les grains de pierre à plâtre se déshydratent pour donner le plâtre semi-hydraté.

La cuisson du plâtre dans des chaudières est le procédé le plus courant et, quoique d'une productivité inférieure aux procédés par tambours de séchage et par cuisson en

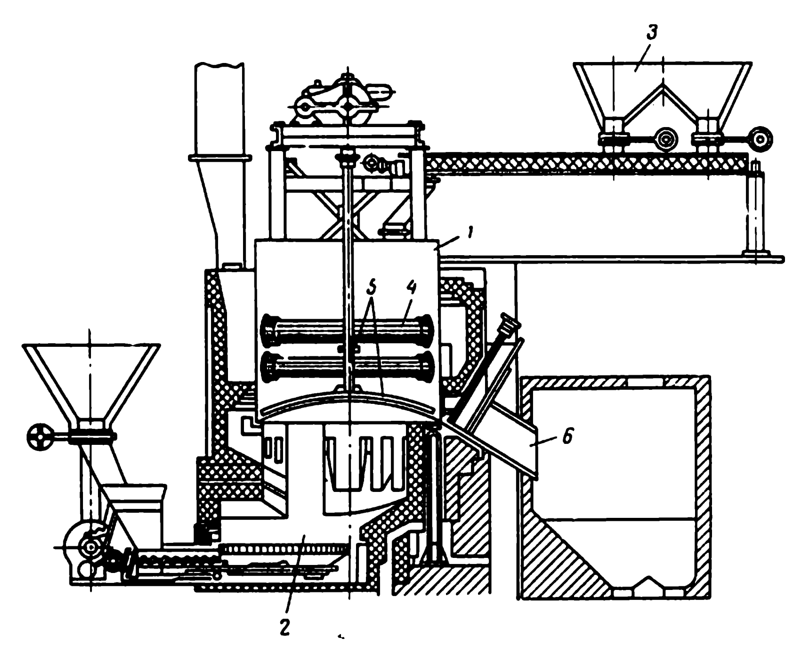


Fig. 46. Chaudière à plâtre :
1 — cylindre en acier à fond sphérique ; 2 — foyer mécanique ; 3 — soutes d'entreposage de la poudre de pierre à plâtre ; 4 — tuyaux de chauffage servant à accroître la surface de chauffe ; 5 — mélangeur ; 6 — glissière d'évacuation

suspension, permet d'obtenir un produit d'une qualité plus stable sans cendres du combustible.

Propriétés du plâtre. *Durcissement du plâtre.* En mélangeant du plâtre pulvérulent avec de l'eau, on obtient une pâte plastique et adhérente, qui s'épaissit assez rapidement et prend la consistance de la pierre.

La théorie classique du durcissement des liants minéraux mise au point par l'académicien soviétique A. Baïkov, explique de la façon suivante la manière dont se déroule le durcissement du plâtre.

Le plâtre semi-hydraté au contact de l'eau commence tout d'abord à se dissoudre. Ensuite, le plâtre semi-hydraté déjà dissous commence à s'hydrater en fixant une molécule et demie d'eau, suivant la réaction :

$$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O.$$

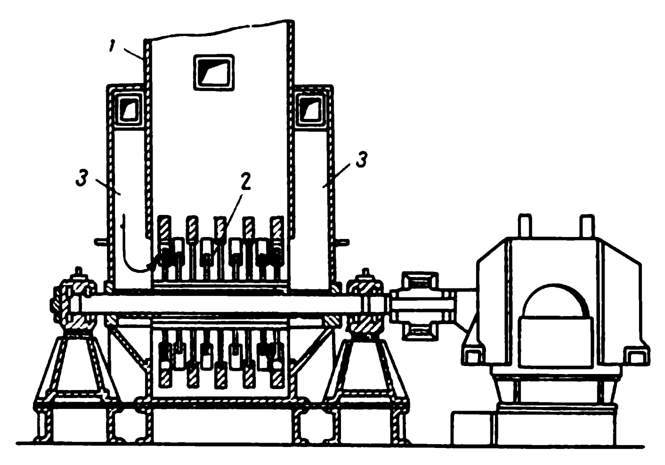


Fig. 47. Broyeur vertical

On a constaté que le plâtre semi-hydraté est cinq fois plus soluble dans l'eau que le plâtre bihydraté. Il en résulte que la solution saturée de plâtre semi-hydraté qui se forme initialement se trouve sursaturée par rapport au plâtre bihydraté. En conditions ordinaires, une solution sursaturée ne peut pas se maintenir. Elle produit un précipité de particules colloïdales extrêmement fines de plâtre bihydraté. Au fur et à mesure de l'absorption de l'eau par la réaction chimique d'hydratation et d'évaporation, les particules colloïdales se rapprochent les unes des autres. Elles forment des cristaux, d'abord petits puis de plus en plus grands, et cette croissance cristalline accroît la résistance mécanique des produits en plâtre.

La masse de plâtre en séchant concourt à la croissance des cristaux et accroît la résistance mécanique du gypse durci. Après dessiccation complète, la résistance mécanique du plâtre cesse d'augmenter. Afin de réduire la durée de durcissement des objets en plâtre, on a recours généralement à la dessiccation artificielle, à une température ne dépassant

pas 65 °C. A une température plus élevée, le plâtre obtenu commence à se déshydrater et la résistance mécanique des objets en plâtre diminue.

Le volume du plâtre augmente de 1% en se solidifiant. Ce gonflement assure un bon remplissage des moules et une fabrication d'objets en plâtre aux dessins nets.

Ce qui caractérise la qualité du plâtre c'est sa résistance mécanique, la finesse de mouture et la rapidité de prise. En ce qui concerne les deux premières caractéristiques, les plâtres sont classés en deux sortes : de première qualité et de deuxième.

L'indice de résistance mécanique du plâtre adopté est la résistance à la compression. On évalue cette résistance à l'aide d'éprouvettes ayant la forme de cubes de 7,07 × × 7,07 × 7,07 cm de côté. On essaie ces cubes à l'âge de 1,5 heure, après les avoir séchés jusqu'à ce que leur poids demeure constant. Ces éprouvettes, confectionnées avec une pâte d'une consistance normale, atteignent leur résistance maximale lorsqu'elles se trouvent à l'état sec à l'air, la résistance mécanique du plâtre cessant d'augmenter par la suite pour les raisons exposées plus haut.

La résistance limite des éprouvettes à la compression est de 100 kg/cm^2 pour le plâtre de première qualité, et de 75 kg/cm^2 pour le plâtre de deuxième qualité (éprouvettes séchées jusqu'à ce que le poids demeure constant).

La résistance mécanique du plâtre dépend de la finesse de mouture, de la quantité d'eau de gâchage et de l'humidité du milieu ambiant dans lequel la prise a lieu.

La résistance mécanique du plâtre est d'autant plus grande que la mouture a été plus fine du fait que les interactions se produisent alors plus complètement entre le plâtre et l'eau. On caractérise la finesse de mouture du plâtre par le pourcentage pondéral de résidus laissé par le plâtre sur le tamis 02 (918 mailles par cm^2). Ce pourcentage ne doit pas dépasser 15% pour la première qualité et 25% pour la deuxième.

La résistance mécanique du plâtre diminue quand la quantité d'eau de gâchage augmente. L'eau excédentaire, qui n'entre pas en réaction chimique avec le plâtre, s'évapore, et les vides qu'elle laisse réduisent la résistance mécanique.

En conditions humides, la résistance mécanique des produits en plâtre diminue par suite de la solubilité relati-

vement forte du plâtre bihydraté. On ne doit donc pas employer les produits en plâtre dans des locaux très humides. Pour augmenter la résistance du plâtre à l'humidité, on lui ajoute de la chaux, ou bien des scories broyées. On peut encore appliquer des enduits imperméables à l'eau sur les produits en plâtre (enduits à l'huile ou à la caséine).

On attache dans le bâtiment une très grande importance à la durée de prise. Cette durée est caractérisée par le début et la fin de la prise et est déterminée avec un instrument spécial. Au début de prise, la pâte de plâtre commence à perdre la plasticité et sa propriété de liant. A la fin de cette période, ces propriétés ont complètement disparu. La pâte de plâtre devra donc être utilisée avant le début de prise, période qui commence au plus tôt quatre minutes après la dissolution de la poudre de plâtre dans l'eau et qui se termine 6 à 30 minutes après cette dissolution.

Pratiquement, on ne parvient pas toujours à se servir de la pâte de plâtre dans les quatre premières minutes. C'est pourquoi on ajoute au plâtre au maximum 5% de chaux, de l'eau dite de collage et d'autres substances qui ralentissent la prise. On exige parfois que la fin de prise soit plus rapide. Pour cela, on ajoute une proportion de 1 à 1,5% (rapportée au poids de plâtre) de sulfate de sodium ou de potassium, de chlorure de sodium, de sulfate de cuivre, etc., ou bien l'on gâche le plâtre avec de l'eau chaude à 40 ou 50 °C. Si l'eau utilisée a une température supérieure à 65 °C, les grains de sulfate de calcium bihydraté qui se sont formés se transforment de nouveau en sulfate semi-hydraté, et la prise se ralentit jusqu'à ce que la température de la pâte tombe au-dessous de 65 °C.

A p p l i c a t i o n s d u p l â t r e. On emploie le plâtre principalement pour fabriquer des cloisons, des plaques à plâtre et pour certains détails architecturaux et moulures. On fabrique les pièces en plâtre avec un mélange de plâtre et d'eau (pâte) ou bien avec un mélange de plâtre, d'eau et d'agrégats (laitiers, sciure, fibre de bois, etc). Les agrégats réduisent la consommation de liant, et par suite le prix du produit. On emploie également le plâtre mélangé à la chaux pour les enduits. On obtient ainsi des revêtements à prise rapide et à surface lisse. De plus, le mortier de plâtre peut être utilisé pour la maçonnerie de la superstructure.

Le plâtre dit **plâtre de moulage** est une variété du plâtre de construction qui se distingue par un grain plus fin et par sa blancheur. Il ne doit contenir aucune impureté pouvant produire des nuances sombres ou grises (cendres de combustible, oxydes colorants divers). La désignation même de ce plâtre montre ses applications. On l'emploie pour fabriquer des objets décoratifs ainsi que pour la finition des intérieurs et les moulures.

Plâtre à haute résistance

Le plâtre à haute résistance a la même composition que le plâtre de construction. C'est un sulfate de calcium semi-hydraté. Par contre, sa structure cristalline diffère de celle du plâtre de construction. Ce dernier est constitué par de petits cristaux de sulfate semi-hydraté $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$, tandis que le plâtre à haute résistance est constitué par de gros cristaux de la même substance.

Les gros cristaux d'une substance quelconque ont une surface spécifique (surface totale des grains pour 1 g de substance) moindre que les petits cristaux. Il faut donc moins d'eau de gâchage pour obtenir une pâte de consistance normale. Une pâte de plâtre de construction de consistance normale exige environ 65% d'eau, la proportion d'eau étant de 45% pour le plâtre à haute résistance. La proportion d'eau liée chimiquement par hydratation est la même dans ces deux variétés de plâtre. Une pierre de plâtre à haute résistance est par conséquent moins poreuse, ce qui explique sa résistance plus élevée.

On fabrique le plâtre à haute résistance par cuisson de la pierre à plâtre en autoclave, sous une pression de vapeur de 1,3 atm.

On distingue diverses qualités ou marques de plâtre à haute résistance, chiffrées de 200 à 400. La qualité indique la résistance limite à la compression, mesurée sur des éprouvettes cubiques de 7,07 cm de côté. On prépare ces éprouvettes avec une pâte de plâtre et on les essaie à l'état sec à l'air.

La rapidité de prise du plâtre à haute résistance est à peu près la même que celle du plâtre de construction.

On emploie le plâtre à haute résistance principalement pour les structures devant être particulièrement résistantes à l'intérieur des bâtiments.

Ciment anhydrite

On fabrique ce liant par cuisson de la pierre à plâtre naturelle à 500-700 °C, suivie du broyage du plâtre complètement déshydraté. Sous cet aspect, le plâtre n'a aucune des propriétés du liant. Si on lui ajoute des catalyseurs chimiques (chaux, sulfate de sodium, laitiers broyés des hauts fourneaux, etc.), on obtient un liant très actif désigné sous le nom de ciment anhydrite.

On peut encore obtenir le ciment anhydrite en broyant ensemble de l'anhydrite naturelle additionnée d'un catalyseur, ou bien en chauffant la pierre à plâtre à une température de 800 à 1 000 °C. Dans ce dernier cas, le sulfate de calcium est partiellement décomposé en chaux et en gaz sulfureux. A cette température de cuisson, la proportion de chaux ne dépasse pas habituellement 3%, la chaux agissant comme catalyseur de prise de l'anhydrite broyée après cuisson.

C'est au savant soviétique P. Boudnikov, membre correspondant de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., que revient surtout le mérite de l'élaboration des principes essentiels de fabrication et d'emploi des liants à plâtre et à l'anhydrite.

On emploie les liants anhydrites pour les sols, la confection d'éléments structuraux et architecturaux, pour le marbre artificiel et dans les mortiers utilisés dans la maçonnerie et les enduits.

Les liants anhydrites ont une résistance mécanique élevée. Les marques ou qualités varient de 50 à 200, chiffres qui indiquent la résistance limite à la compression d'éprouvettes cubiques après 28 jours. Ces éprouvettes sont préparées avec un mortier 1 : 3 en poids (une partie de ciment et 3 parties de sable). De même que le plâtre, le ciment d'anhydrite est un liant qui ne résiste pas à l'eau. On ne devra donc l'employer que dans les locaux secs.

b) Chaux

La chaux employée en construction est le résultat d'un brocardage fin des calcaires cuits à une température de l'ordre de 1 000 °C.

On distingue les deux catégories suivantes de chaux de construction d'après les conditions de prise :

les *chaux aériennes* ne font prise qu'à l'air sec ;

Les *chaux hydrauliques* font prise aussi bien dans l'eau qu'à l'air (voir page 148).

La chaux aérienne, que l'on obtient par cuisson d'une pierre calcaire, est appelée chaux vive ou effervescente et ne constitue pas un liant. Pour obtenir un liant à partir de cette chaux en morceaux, il faut la broyer.

On emploie deux procédés pour réduire la chaux en morceaux : 1) par broyage dans des broyeurs à boulets ou autres ; 2) par extinction, c'est-à-dire par l'action de l'eau sur les morceaux de chaux. Les morceaux se dispersent spontanément en particules minuscules.

D'après le procédé employé pour broyer la chaux en morceaux, on distingue les deux catégories suivantes de chaux commerciales aériennes : la chaux vive et la chaux éteinte ou hydratée.

On obtient la *chaux vive* par brocardage mécanique des morceaux de chaux vive. Cette chaux est en principe de l'oxyde de calcium.

On obtient la *chaux éteinte* ou *hydratée*, en éteignant la chaux en morceaux par une quantité d'eau modérée (jusqu'à rendre la chaux pulvérulente). Au point de vue chimique, cettre chaux est un hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$.

La pâte de chaux est le résultat de l'extinction de la chaux vive en morceaux par une quantité d'eau excédentaire. La pâte de chaux est en principe un mélange d'hydroxyde de calcium et d'eau.

Au cours du broyage de la chaux en morceaux, on peut lui ajouter des additions minérales actives ou hydrauliques. Parmi ces produits d'addition, on peut citer les laitiers et cendres des hauts fourneaux et de foyers divers, les cendres volcaniques, la pierre ponce, le tuf, le sable de quartz, l'argile pulvérisée, la terre d'infusoires et la pierre à plâtre. On obtient ainsi la chaux vive avec produits d'addition.

La chaux broyée et carbonatée est une variété de chaux aérienne. On l'obtient en broyant ensemble la chaux vive en morceaux et des pierres calcaires (carbonates).

C h a u x v i v e e n m o r c e a u x. Si l'on cuit le carbonate de calcium $CaCO_3$ à une température d'environ 1 000 °C, il se décompose en gaz carbonique et en oxyde de calcium. Ce dernier est la partie essentielle et active de la chaux aérienne. La réaction de dissociation du calcaire est la suivante :

$$CaCO_3 = CaO + CO_2.$$

Outre le carbonate de calcium, les calcaires contiennent toujours plus ou moins de carbonate de magnésium, $MgCO_3$. Au cours de la cuisson, celui-ci se décompose comme suit :

$$MgCO_3 = MgO + CO_2.$$

Il en résulte que la chaux vive en morceaux est essentiellement un mélange de CaO et MgO. Ces deux oxydes sont les composants actifs des chaux aériennes.

La cuisson du calcaire se fait de préférence dans des fours vertical ou rotatif. Dans un four vertical la cuisson du calcaire se déroule de la façon suivante (fig. 48).

La chaux mélangée à du charbon est chargée en continu ou périodiquement dans le cylindre du four *1*, par le gueulard *2*. Les matériaux cuits sont évacués sans arrêt par un mécanisme *3* à la base du four. On refroidit ces matériaux avec de l'air qui arrive par en dessous, à travers une grille *4*. La matière traitée progresse continuellement de haut en bas, en sens inverse du courant d'air, et traverse successivement la zone de réchauffage *I*, la zone de cuisson *II* et la zone de refroidissement *III*. Dans la première zone, la matière subit l'action des gaz chauds provenant de la zone de cuisson ; elle se dessèche et se réchauffe jusqu'à la température de cuisson. Dans la zone de cuisson, le combustible brûle et le carbonate de calcium se décompose. Dans la zone de refroidissement, la matière incandescente est refroidie par l'air froid refoulé dans le four.

Les fumées et les produits gazeux de décomposition du calcaire sont évacués par le tuyau *6* à l'aide de l'aspirateur de fumée *5*.

A la sortie du four, la chaux cuite en morceaux est envoyée à l'entrepôt par un transporteur à écailles *7* ou bien par un transporteur à bande d'acier.

La chaux vive en morceaux ainsi obtenue est un produit semi-fini. Avant de l'employer comme liant dans les travaux de construction, on la broie pour obtenir de la chaux vive fine, ou bien on l'éteint avec de l'eau pour obtenir la chaux éteinte.

C h a u x v i v e f i n e. Cette chaux est une poudre finement broyée que l'on obtient à partir de la chaux vive en morceaux.

A la différence de la chaux éteinte, la chaux vive fine peut prendre prise et durcir rapidement.

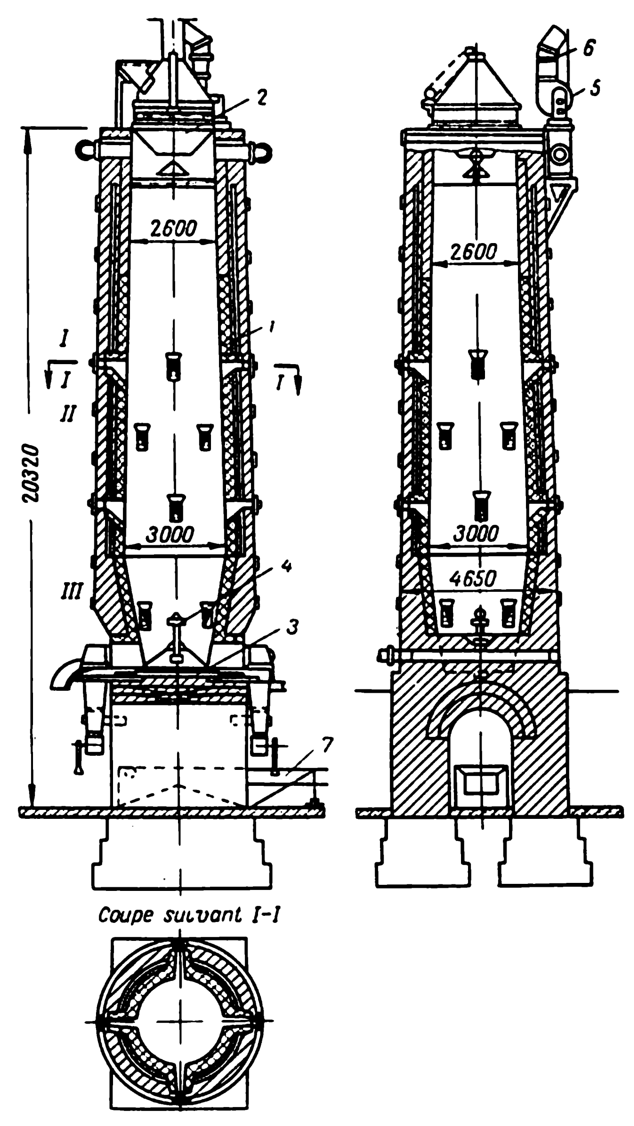


Fig. 48. Four vertical

Pour fabriquer les mortiers de chaux, on ajoute à la chaux vive fine environ 100 à 150% d'eau (rapportés au poids de la chaux). Cette proportion d'eau ne provoque pas une réaction violente de la chaux, mais est suffisante pour que le mortier prenne prise rapidement. La chaleur dégagée à l'extinction de la chaux vive fine n'est pas perdue, comme c'est le cas avec l'emploi de la chaux éteinte ; elle sert à évaporer l'eau contenue dans le mortier de chaux et concourt ainsi à son durcissement et son séchage rapide. Il est particulièrement avantageux d'employer la chaux vive fine en hiver, les mortiers ordinaires devant être réchauffés de toute façon pour ne pas geler. Les mortiers de chaux vive fine n'ont pas besoin d'être réchauffés, car il se dégage à l'extinction une quantité de chaleur suffisante pour maintenir la température du mortier au-dessus de 0 °C.

Chaux éteinte. La chaux éteinte résulte de la réaction de l'eau sur la chaux vive en morceaux. La réaction d'hydratation est la suivante :

$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2 + Q \text{ kcal.}$$

Cette réaction s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur.

Suivant la quantité d'eau absorbée par l'extinction, on obtient de la chaux éteinte ou bien une pâte de chaux.

La *chaux hydratée* (ou chaux en poudre) est une poudre blanche que l'on obtient avec 70 à 100% d'eau (rapportés au poids de chaux) pour l'extinction de la chaux en morceaux.

En réagissant avec l'eau, les morceaux de chaux se désagrègent en une poudre fine dont le volume est environ trois fois plus grand que le volume du produit initial.

On utilise relativement peu la chaux hydratée ou en poudre pour les travaux de construction par suite de la difficulté de sa fabrication. Pour préparer les mortiers, on emploie principalement la pâte de chaux.

Si l'on prend un volume d'eau 3 à 4 fois plus grand que le volume de chaux, l'extinction produit une *pâte plastique de chaux* dont le volume est d'autant plus grand que la chaux est meilleure. On appelle *rendement* ou *productivité de la pâte de chaux* le volume de la pâte de chaux (exprimé en litres) qu'on obtient par l'extinction de 1 kg de chaux vive.

Le rendement en pâte de chaux dépend de la quantité des incuits et des biscuits qui s'éteignent lentement dans la chaux en morceaux. Les impuretés d'argile contenues dans le calcaire réduisent également le rendement en pâte de chaux.

La chaux éteinte est d'autant meilleure que la chaux vive réagit plus complètement avec l'eau. Lorsque l'extinction est complète, on obtient une masse plastique finement dispersée, qui enrobe bien les grains de sable dans le mortier et qui s'agglomère énergiquement à eux.

Jadis, pour améliorer l'extinction, on conservait pendant longtemps la pâte de chaux dans des fosses d'extinction. L'action prolongée de l'eau avait pour effet d'hydrater complètement la chaux.

Pour accélérer l'hydratation et l'extinction, on fait passer aujourd'hui la chaux en morceaux par des dispositifs spéciaux, qui sont appelés des hydrateurs ou extincteurs de chaux. La partie essentielle d'un hydrateur est une cuve ou un tambour métallique qu'on alimente en chaux vive et en eau. A l'intérieur du tambour se trouvent des pales rotatives qui brassent la chaux et assurent ainsi une interaction plus complète et rapide entre la chaux et l'eau.

Dans certains types d'hydrateurs, on sépare les particules de chaux hydratée et des biscuits et incuits à l'aide d'un courant d'eau ascendant.

Les hydrateurs peuvent être à fonctionnement continu ou discontinu. Dans les hydrateurs à fonctionnement discontinu, on introduit alternativement les charges de chaux vive et d'eau. L'extinction une fois terminée, la chaux est déchargée de l'hydrateur. Dans les hydrateurs continus, on charge d'une manière ininterrompue l'eau et la chaux vive dans l'appareil et l'on décharge la chaux éteinte de la même manière.

Les hydrateurs continus ont une productivité plus élevée. L'hydrateur IO3 (fig. 49) est l'un des types d'appareils à fonctionnement continu employés dans les centrales et sur les chantiers de construction. Cet appareil est doté de rouleaux ou cylindres qui broient les grains non éteints, assurant ainsi une extinction absolument totale de la chaux. Dans l'extinction ordinaire, on n'utilise pas les grains de chaux non éteints, bien que leur proportion atteigne assez souvent 15 à 20%. Il faut remarquer que les particules non éteintes nuisent à la qualité des mortiers, leur extinction

se déroulant dans le mortier durci, ce qui provoque sa fissuration.

Propriétés de la chaux aérienne. Le durcissement de la chaux éteinte se déroule toujours très lentement et nécessite toujours un air sec.

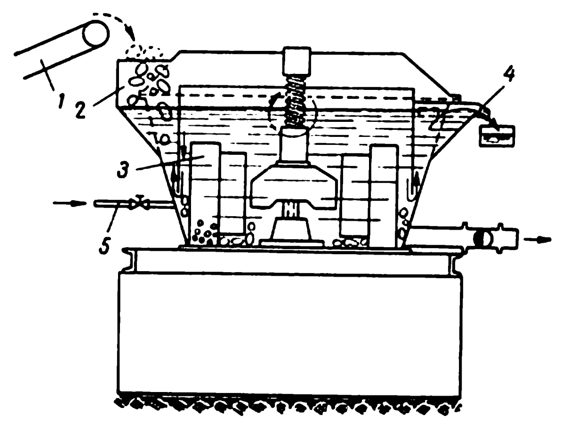


Fig. 49. Appareil d'extinction de la chaux IO3 :
1 — transporteur d'alimentation de la chaux en morceaux; 2 — cuve d'alimentation; 3 — rouleaux; 4 — chéneau de déversement; 5 — conduite d'alimentation en eau

Pendant le durcissement, les particules très fines d'hydroxyde de calcium se rapprochent et s'agglomèrent en formant des cristaux. A mesure que l'eau s'évapore, la quantité de cristaux formés augmente. Ces cristaux s'entremêlent pour former un réseau tenace qui pénètre dans la masse de la pâte de chaux.

La carbonatation contribue également à la consolidation ou augmentation de la résistance de la pâte de chaux. En présence d'humidité, la chaux peut absorber le gaz carbonique de l'air, se transformer ainsi en carbonate de calcium :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O.$$

Les mortiers de chaux se carbonatent généralement à une profondeur insignifiante : 5 à 7 mm au plus au cours de plusieurs mois. Cela s'explique par le fait que la pellicule de carbonate de calcium qui se forme à la surface s'oppose de plus en plus à la pénétration du gaz carbonique dans l'hydroxyde de calcium. Il faut remarquer ici que l'in-

fluence de la carbonatation sur la résistance d'un mortier de chaux est moins forte au début de durcissement que pendant la phase de dessiccation. C'est pourquoi les produits en chaux ordinaire doivent durcir à l'air dans un milieu sec (température supérieure à 0 °C et faible humidité du milieu ambiant).

La formation d'une pellicule de carbonate de calcium à la surface d'un mortier de chaux a principalement pour effet d'accroître la résistance du produit à l'eau. L'hydroxyde de calcium a une solubilité relativement élevée dans l'eau (jusqu'à 1,3 g/l) alors que la solubilité du carbonate de calcium est 40 fois plus faible (0,03 g/l).

Le durcissement de la chaux vive fine diffère quelque peu du durcissement de la chaux éteinte. La poudre mélangée à l'eau forme une pâte plastique de chaux qui s'épaissit et durcit relativement vite du fait que la chaleur dégagée par l'interaction de la chaux vive et de l'eau est consommée pour évaporer l'eau de la pâte de chaux, ce qui accélère le processus de durcissement. C'est pourquoi les mortiers et bétons de chaux vive fine durcissent plus rapidement et sont plus résistants.

Qualités des chaux. On distingue deux sortes ou qualités de chaux aérienne. Ce classement repose sur la proportion des matières actives, CaO + MgO, en pour cent, qui déterminent le rendement en pâte de chaux, la vitesse de prise et la proportion de grains non éteints. Dans une chaux de première qualité, la proportion de matières actives, Cao + MgO, ne doit pas être inférieure à 85%. Dans la deuxième qualité, elle ne doit pas être inférieure à 70%.

Dans la chaux vive en morceaux, la proportion de grains non éteints ne doit pas dépasser 10% pour les chaux de première qualité et 20% pour les chaux de deuxième qualité.

En ce qui concerne la vitesse d'extinction, on classe les chaux vives en chaux à extinction rapide (moins de 20 minutes) et en chaux à extinction lente (plus de 20 minutes).

La chaux vive fine est brocardée jusqu'à une finesse déterminée : le résidu laissé sur le tamis 063 ne doit pas dépasser 2% ni 10% sur le tamis 009. Si le broyage est grossier, les produits durcis risquent de se fissurer.

L'humidité de la chaux brute hydratée ne doit pas dépasser 5% de l'ensemble de la matière humide.

A p p l i c a t i o n s. La chaux aérienne est l'un des liants les plus importants. Dans les travaux de construction, elle trouve les applications suivantes :

préparation de mortiers pour maçonneries des superstructures mises en œuvre à l'air sec ;

mortiers et bétons de ciment et de chaux ; l'emploi de la chaux en ces conditions permet d'économiser le ciment Portland et améliore la mise en œuvre ;

préparation de liants hydrauliques : ciments de chaux et de laitiers et ciments de chaux et de pouzzolanes ;

préparation de produits silicatés (produits d'autoclave) ;

préparation des pierres de béton léger (mélanges avec du ciment ou des additions) ;

préparation des bétons de qualité inférieure pour structures à l'air sec.

Le défaut principal de la chaux aérienne est qu'elle donne des mortiers de faible résistance ne résistant pas à l'humidité.

c) Liants magnésiens

Les liants magnésiens sont des liants aériens. Ils sont constitués par de fines poudres de magnésite caustique ou de dolomite caustique mélangées avec des solutions aqueuses de chlorure de magnésium ($MgCl_2$).

D'après la matière première employée, on distingue la m a g n é s i t e c a u s t i q u e, que l'on obtient par cuisson de la magnésite qui est un carbonate de magnésium, $MgCO_3$, et la d o l o m i t e c a u s t i q u e, que l'on obtient par cuisson de la dolomite, qui est un carbonate double de magnésium et de calcium, $MgCO_3 \cdot CaCO_3$.

F a b r i c a t i o n. A une température de 700 à 800 °C, le carbonate de magnésium $MgCO_3$ se décompose en oxyde de magnésium et en gaz carbonique, suivant la réaction : $MgCO_3 = MgO + CO_2$.

L'oxyde de magnésium qui se forme est la matière active du liant. La décomposition du carbonate de magnésium se produit théoriquement à 500 °C, mais dans la pratique, on porte cette température jusqu'à 700-800 °C. Lorsque la température de cuisson augmente, l'oxyde de magnésium commence à perdre ses propriétés de liant. Au-delà de 1 300 °C, on obtient ce que l'on appelle la magnésite cuite à mort, dépourvue de propriétés liantes, mais matière

première très appréciée dans la fabrication des matériaux réfractaires.

Si l'on fabrique un liant magnésien à partir de la dolomite, le carbonate de calcium contenu dans la dolomite ne se décompose pas à la température de cuisson. Il en résulte que, après cuisson, la dolomite caustique est constituée par de l'oxyde de magnésium MgO et par du carbonate de calcium $CaCO_3$.

Le carbonate de calcium ne possède pas de propriétés liantes, il constitue une matière inerte, ou ballast, qui abaisse la qualité du ciment magnésien obtenu à partir de la dolomite. Le prix de la dolomite caustique est toutefois très inférieur à celui de la magnésite caustique, la magnésite étant moins répandue dans la nature que la dolomite.

L'oxyde de magnésium réagit lentement à l'eau. C'est pourquoi la résistance mécanique d'un liant magnésien mélangé avec de l'eau est faible. Pour accroître la solubilité de l'oxyde de magnésium et obtenir un liant plus résistant, on emploie des solutions aqueuses de chlorure de magnésium ou de sulfate de magnésium. C'est pour cette raison qu'on appelle ciment de magnésie une poudre de magnésite caustique (ou de dolomite caustique) mélangée avec une solution aqueuse de chlorure ou de sulfate de magnésium. L'hygroscopicité du ciment magnésien obtenu avec une solution de sulfate de magnésium ainsi que sa résistance mécanique sont inférieures à celles du ciment obtenu avec une solution de chlorure de magnésium.

Propriétés et applications. D'après la limite de résistance à la compression mesurée sur des éprouvettes en mortier de composition pondérale 1 : 3 (1 liant et 3 sable), on a défini les marques ou qualités de 400 à 600 pour la magnésite caustique et de 100 à 300 pour la dolomite.

On emploie les liants magnésiens pour les sols en xylolite, dans lesquels la sciure de bois est le principal agrégat. Les sols en xylolite sont excellents au point de vue hygiénique et durent longtemps par leur faible conduction. Ces sols se rapprochent des parquets en chêne.

A l'aide des déchets du bois (sciures) et du ciment magnésien, on fabrique des dalles comprimées pour les revêtements des sols.

On emploie également les liants magnésiens pour les enduits des intérieurs. Dans ce cas, on peut employer comme

agrégat le sable ordinaire. Un tel enduit est très résistant. En outre, leur utilisation réduit la consommation en ciment et permet de terminer plus vite les travaux.

Enfin, on emploie ces liants également pour fabriquer divers éléments de construction (appuis de fenêtre, marches d'escalier), des plaques en fibrolite et divers matériaux calorifuges.

d) Verre soluble et ciment antiacide

Verre soluble. Le verre soluble est un liant que l'on emploie dans la confection des revêtements résistant aux acides et à la chaleur pour différents matériels ainsi que pour les ateliers de l'industrie chimique. On l'appelle également verre liquide, parce qu'il peut, à la différence du verre ordinaire, se dissoudre dans l'eau.

On obtient le verre soluble en faisant fondre à 1 400 °C un mélange finement pulvérulent et intime de sable quartzeux et de soude calcinée ou de sulfate de sodium. La réaction chimique entre le sable et la soude produit le silicate de sodium, $Na_2O \cdot nSiO_2$, que l'on extrait du four et qu'on laisse refroidir. La masse solide de verre soluble est également appelée silicate brut ou en morceaux.

Habituellement, on dissout ce silicate brut dans l'eau chaude sous une pression de vapeur de 3 à 5 atm, jusqu'à obtenir une consistance sirupeuse. Dans les conditions ordinaires, le silicate brut est pratiquement insoluble dans l'eau.

Applications. On emploie le verre soluble pour faire des enduits, solutions et bétons ignifuges, isolants et résistant aux acides et à la chaleur. Il est également à la base du ciment résistant aux acides.

Pour accroître la résistance des enduits et solutions à l'eau, on ajoute au verre soluble une proportion de 15% de silicofluorure de sodium.

Le ciment résistant aux acides, ou ciment antiacide, est un mélange pulvérulent de silicofluorure de sodium Na_2SiF_6 et de sable quartzeux. On l'emploie comme enduit, pour les équipements et éléments structuraux des usines chimiques.

On ne doit pas employer le ciment antiacide dans les locaux qui, par suite des conditions d'exploitation, sont soumis longtemps à l'action de l'eau ou de solutions aqueu-

ses basiques, car la dissolution qui se produit peut détériorer le ciment durci.

Le durcissement du ciment antiacide cesse aux températures inférieures à +10 °C. Pendant la première période de durcissement il faut donc maintenir la température du local à au moins 15 ou 20 °C. La prise et le durcissement s'accélèrent quand la température augmente.

Pour accroître la résistance aux acides, la surface du ciment est traitée au bout de 15 à 20 jours de durcissement par l'acide qui agira sur cette surface en cours de service.

§ 2. LIANTS HYDRAULIQUES

Les substances qui ont la propriété de durcir dans un milieu aqueux sont des substances pulvérulentes dont la composition comprend principalement des combinaisons de l'oxyde de calcium CaO avec la silice SiO_2, l'alumine Al_2O_3 ou le sesquioxyde de fer Fe_2O_3.

De telles combinaisons sont appelées respectivement des silicates (nCaO·SiO_2), aluminates (nCaO·Al_2O_3), ferrites (nCaO·Fe_2O_3) et aluminoferrites de calcium (nCaO·Al_2O_3·Fe_2O_3). Ce dernier cas est celui dans lequel la combinaison hydraulique comprend les trois oxydes. Dans les combinaisons précitées, le nombre des molécules de l'oxyde de calcium (n) peut varier de 1 à 3 ou même davantage.

On peut employer deux procédés pour fabriquer les produits hydrauliques précités : 1) par cuisson de certaines roches, 2) en mélangeant avec de l'eau la chaux et d'autres substances dont les oxydes sont actifs.

La cuisson de certaines roches et de certains mélanges artificiels de carbonate de calcium et d'argile permet d'obtenir la chaux hydraulique, les ciments Portland et les ciments alumineux et expansifs. Les principaux composants de l'argile sont la silice, l'alumine et des oxydes de fer.

En mélangeant avec de l'eau la chaux et des substances qui contiennent des oxydes acides sous forme active, on obtient des composés hydrauliques, par exemple les hydrosilicates de calcium et en particulier CaO·SiO_2·nH_2O, qui ont des propriétés adhésives. Ce procédé permet de fabriquer les ciments pouzzolaniques à la chaux et les ciments de laitier à la chaux ainsi que d'autres liants d'importance locale.

a) Chaux hydraulique

Les calcaires contenant une forte proportion de substances argileuses (jusqu'à 20%) sont très répandus dans la nature. Le produit que l'on obtient par cuisson a la propriété de s'éteindre tout comme la chaux aérienne. Mais à la différence de la chaux aérienne, cette chaux peut durcir non seulement dans l'air mais aussi dans l'eau.

On appelle chaux hydraulique les produits finement pulvérulents que l'on obtient par cuisson des calcaires contenant 6 à 20% de substance argileuse.

A une température de cuisson de l'ordre de 1 000 °C, les particules argileuses réagissent avec l'oxyde de calcium résultant de la décomposition ou dissociation du calcaire. Les produits de cette décomposition, qui sont des silicates et aluminates de calcium, peuvent durcir dans l'eau lorsqu'ils sont broyés à l'état de poussière. Les propriétés hydrauliques de la chaux sont d'autant plus marquées que la proportion de ces dernières substances est plus élevée.

La fabrication de la chaux hydraulique ne diffère pas en principe de la fabrication des chaux aériennes.

On fabrique la chaux hydraulique tout comme la chaux aérienne soit à l'état de chaux vive fine, soit à l'état de chaux éteinte en poudre et comportant des impuretés pulvérulentes non éteintes. Ces dernières se composent surtout de silicates, d'aluminates et de ferrites de calcium, c'est-à-dire de combinaisons hydrauliques.

Propriétés. Dans une chaux hydraulique, une partie de l'oxyde de calcium est liée chimiquement dans les combinaisons hydrauliques précitées, le reste de l'oxyde de calcium subsistant à l'état libre. C'est pour cette raison que le durcissement de la chaux hydraulique est accompagné à la fois par des phénomènes de dessiccation et carbonatation de la pâte (de même que dans la chaux aérienne) et par une hydratation des silicates et aluminates de calcium, dont le durcissement sera étudié plus loin, à la page 153.

Les mortiers de chaux hydraulique doivent être conservés à l'air pendant un certain temps au début de prise (de 7 à 21 jours) ; ensuite, on peut les mouiller sans danger de diminution de la résistance mécanique.

La charge de rupture à la compression d'éprouvettes confectionnées avec une partie pondérale de chaux hydraulique et trois parties de sable dit de Volsk ne doit pas être

inférieure à 20 kg/cm² à l'âge de 28 jours après un vieillissement combiné (7 jours à l'air humide et 21 jours dans l'eau).

A p p l i c a t i o n s. On peut employer la chaux hydraulique tout comme la chaux aérienne, mais on obtient alors des mortiers et des bétons d'une résistance mécanique plus élevée et qui résistent mieux à l'eau. Comme il a été déjà dit, la chaux hydraulique diffère essentiellement de la chaux aérienne par le fait qu'elle peut durcir dans un milieu aqueux. Cette propriété étend son domaine d'emploi et permet d'utiliser les chaux hydrauliques pour la construction des parties d'ouvrages situées dans un milieu humide (fondations, soubassements, canaux d'irrigation et autres ouvrages hydrauliques peu importants).

On emploie essentiellement la chaux hydraulique dans les mortiers pour la maçonnerie et les enduits exposés à la fois à la sécheresse et à l'humidité. On peut à la rigueur également employer les chaux hydrauliques pour fabriquer les bétons de qualité inférieure et les ciments de laitiers et de pouzzolanes. Dans la préfabrication, la chaux hydraulique sert à la confection des éléments de murs des maisons de peu d'étages.

b) Ciment Portland

Le ciment Portland est un liant hydraulique que l'on obtient en broyant finement un mélange d'argile et de carbonate de calcium cuits jusqu'à commencement de ramollissement. Les matières premières scorifiées et agglomérées en petites balles ont reçu le nom de *clinker*.

Pour régler les propriétés du ciment Portland et aussi pour réduire son prix, on peut ajouter au clinker, lors de sa mouture, jusqu'à 15% d'additions actives (terre d'infusoires, diatomite, etc.) et jusqu'à 10% d'agrégats inertes (calcaire, dolomite, sable quartzeux, etc.).

Le clinker finement broyé prend rapidement lorsqu'il est mélangé à l'eau, ce qui rend difficile son emploi pratique. Pour ralentir la prise du ciment Portland, on lui ajoute au cours de la mouture jusqu'à 3% de plâtre, le calcul étant ramené à l'anhydride sulfurique SO_3.

F a b r i c a t i o n. Les opérations principales de la fabrication du ciment Portland comprennent l'obtention du clinker à partir du mélange brut suivie du broyage du

clinker avec le plâtre et les autres additions. L'obtention du clinker, qui est la première opération, est également la plus importante. Durant cette opération, on obtient à partir de l'argile et du calcaire les combinaisons minérales

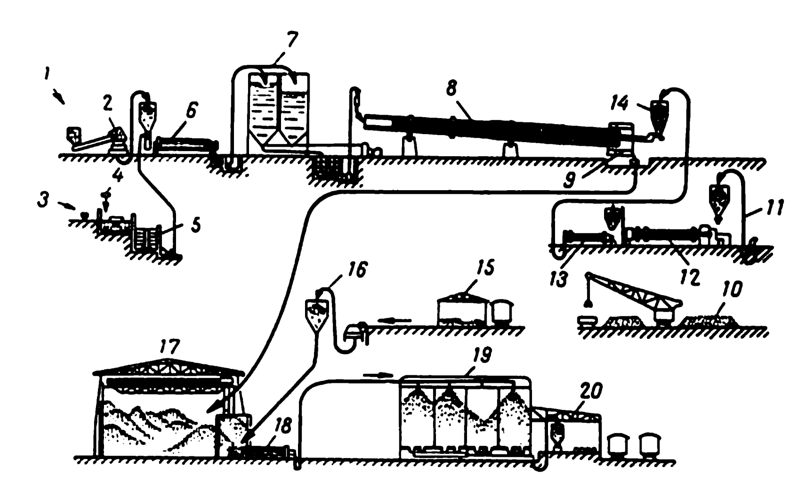


Fig. 50. Schéma de la méthode de production du ciment Portland par voie humide :

1 — arrivée du calcaire brut ; *2* — concasseur du calcaire ; *3* — arrivée de l'argile brute ; *4* — arrivée de l'eau ; *5* — réservoir de brassage de l'argile; *6* — broyeur de la matière brute ; *7* — réservoirs des boues ; *8* — four rotatif; *9* — réfrigérant ; *10* — dépôt de charbon ; *11* — élévateur alimentant la trémie en charbon venant du concasseur ; *12* — tambour de séchage du charbon; *13* — broyeur à charbon ; *14* — pompe à charbon pulvérisé ; *15* — dépôt de plâtre ; *16* — élévateur alimentant la trémie en plâtre venant du concasseur ; *17* — magasin à clinker ; *18* — broyeur de ciment ; *19* — silos à ciment ; *20* — ensachage

suivantes, qui sont les principaux composants du clinker :

silicate tricalcique ou alite, $3CaO \cdot SiO_2$,

silicate bicalcique ou bélite, $2CaO \cdot SiO_2$,

aluminate tricalcique, $3CaO \cdot Al_2O_3$,

aluminoferrite tétracalcique, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$.

Pour que tous les oxydes de l'argile réagissent complètement, au cours de la cuisson, avec l'oxyde de calcium résultant de la décomposition du carbonate de calcium, il faut broyer finement et mélanger intimement le calcaire et l'argile. Ce broyage et ce brassage peuvent être faits à l'état humide ou à l'état sec. On distingue donc deux procédés de production du ciment Portland : par voie humide et par voie sèche.

En Union Soviétique, le procédé par voie humide est le plus répandu bien qu'il soit moins avantageux au point de vue de la consommation en combustible.

La figure 50 représente le schéma de la méthode de production du ciment Portland par voie humide, qui est le suivant.

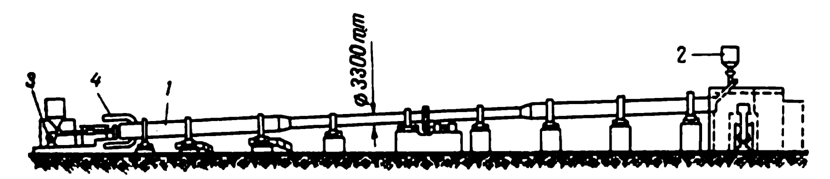


Fig. 51. Four rotatif

L'argile est tout d'abord transformée dans l'appareil *5* en boue liquide argileuse. Ensuite, on l'envoie dans le broyeur *6* alimenté en même temps en calcaire concassé *2*. L'argile et le calcaire sont chargés dans le broyeur en proportions rigoureusement déterminées. Après mouture, le mélange pâteux de calcaire, d'argile et d'eau, que nous appellerons la boue, est envoyé dans le réservoir des boues *7* où l'on corrige la composition de la boue et où on la brasse soigneusement. Cette boue contient à peu près 75% de carbonate de calcium et 25% d'argile rapportées aux matières solides. A sa sortie du réservoir *7*, la boue passe dans le four de cuisson rotatif *8*.

Les fours rotatifs modernes (fig. 51) ont 150 à 180 m de longueur et 3,5 à 5,0 m de diamètre. Ils peuvent produire quotidiennement plus de 1 000 tonnes de clinker. Pour accroître la productivité des fours rotatifs, la boue est introduite par projection pulvérisée, et l'on prévoit dans le four des chaînes formant des rideaux qui améliorent le contact entre le mélange et les gaz chauds.

On donne au four rotatif *1* une certaine inclinaison sur l'horizontale, ce qui permet à la matière de progresser vers l'extrémité inférieure pendant la rotation. On introduit la boue par l'extrémité supérieure du four, au moyen d'un alimenteur spécial *2*, le combustible pulvérisé étant injecté par l'extrémité opposée à l'aide du ventilateur *3*. Le combustible brûle dans le voisinage de son arrivée. C'est dans cette zone que la température est maximale (elle peut atteindre

1 500 °C). Cette température est nécessaire pour scorifier le clinker et former les minéraux mentionnés plus haut. Cette zone du four est appelée zone de cuisson.

Les gaz de combustion ou fumées sont évacués du four à l'extrémité opposée, là où l'on introduit la boue. Ils se déplacent donc le long du tambour à la rencontre de la matière soumise à la cuisson qu'ils réchauffent progressivement tout en se refroidissant eux-mêmes. Aussi, à partir de la zone de cuisson, la température diminue de 1 500° à 100 ou 150 °C à l'intérieur du four.

A mesure que la matière première progresse en direction des températures élevées, il y a d'abord évaporation de l'eau contenue dans la boue ; ensuite, les impuretés organiques contenues dans la matière première sont brûlées, puis, à une température de 1 000 à 1 100 °C, le calcaire se décompose en oxyde de calcium et en gaz carbonique. Le gaz s'échappe, mais l'oxyde de calcium réagit avec les composants de l'argile.

Dans la suite de la progression de la matière en cours de cuisson, l'augmentation de la température et la fusion partielle des composants (scorification) accélèrent les réactions entre CaO d'une part et SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, d'autre part.

Ces réactions entre la chaux et les oxydes de silicium, d'aluminium et de fer dans le clinker du ciment Portland forment les quatre combinaisons minérales essentielles indiquées plus haut : silicate tricalcique, silicate bicalcique, aluminate tricalcique et aluminoferrite tétracalcique.

A la sortie de la zone de cuisson, le clinker sous forme de petites balles grises très dures agglomérées passe dans le cylindre refroidisseur *4* (fig. 51) où il est refroidi par un courant opposé d'air froid. Après refroidissement, le clinker est envoyé en silos.

En plus de quatre combinaisons mentionnées, le clinker peut également contenir de la chaux libre CaO, qui n'a pas réagi avec l'argile. Or, la présence de cette chaux libre dans le ciment Portland est très nuisible à ses propriétés : si alors on ajoute de l'eau au ciment Portland, la chaux s'éteint en augmentant de volume, ce qui a pour effet de fissurer les mortiers et les bétons pris. On dit qu'un tel ciment n'a pas une variation de volume uniforme.

Pour éviter l'influence nuisible de la chaux libre, on laisse le clinker se reposer pendant 2 à 4 semaines. Pendant

cette période, la chaux libre s'éteint complètement sous l'action de l'humidité de l'air. Dans les usines à mécanisation et automation poussées, la qualité du clinker est suffisamment bonne pour pouvoir se passer du silotage.

Après silotage, on broie le clinker dans des broyeurs à boulets. Le ciment sort de ces broyeurs à une température dépassant assez souvent 100 °C. Pour le refroidir, on l'envoie dans des silos. Au bout de 7 à 14 jours de repos dans le silo, on l'envoie sur les chantiers, en vrac ou bien en sacs en papier de 50 kg.

La fabrication du ciment Portland par *voie sèche* diffère du procédé humide par le fait que les matières brutes sont d'abord séchées, après quoi on les broie et on les brasse soigneusement dans des silos spéciaux.

Avec la farine brute, on prépare des granules (grains de 40 mm au maximum) qu'on cuit ensuite dans des fours rotatifs ou verticaux.

Durcissement du ciment Portland. Les phénomènes qui se produisent au cours du durcissement du ciment Portland sont analogues à ceux que nous avons décrits pour le plâtre de construction (voir p. 131). En mélangeant le ciment Portland à l'eau, on obtient une pâte plastique. Au bout de quelque temps, cette pâte commence à devenir plus dense et consistante (début de prise) ; ensuite, elle se transforme en une matière solide dont la résistance mécanique est encore faible (fin de prise).

D'après la théorie de l'académicien soviétique A. Baïkov, on distingue trois périodes dans le durcissement du ciment Portland.

Première période: dissolution des minéraux jusqu'à formation d'une solution saturée ; réaction entre l'eau et les principaux minéraux du clinker :

$$3CaO \cdot SiO_2 + (n+1)H_2O = 2CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O + Ca(OH)_2,$$
$$2CaO \cdot SiO_2 + nH_2O = 2CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O,$$
$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O.$$

Des trois réactions, seul le silicate tricalcique $3CaO \cdot SiO_2$ est décomposé par l'eau (hydrolyse) ; il forme alors la chaux libre $Ca(OH)_2$. Les réactions des deux autres minéraux se terminent, par contre, par une hydratation, l'adjonction de plusieurs molécules d'eau. On obtient alors l'hydrosilicate bicalcique $2CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ et l'hydroaluminate tricalcique.

La libération de la chaux par hydrolyse du silicate tricalcique a une très grande importance pratique. Ce phénomène réduit en effet l'endurance du ciment Portland en conditions humides (voir p. 157, la corrosion du ciment Portland).

Deuxième période: transformation colloïdale. Les hydrates des minéraux du clinker qui se sont formés précédemment commencent à se séparer de la solution sous la forme colloïdale. Les grains de ciment Portland ne se dissolvent seulement qu'en surface, ils se recouvrent de dépôts colloïdaux qui prennent progressivement de la consistance et empêchent l'eau de pénétrer dans les parties centrales des grains de ciment. La formation de masses colloïdales (colle) sur la surface des grains a pour effet d'agglomérer ces grains entre eux et avec les grains de sable lorsque les mortiers ou bétons durcissent. De plus, ces masses colloïdales rendent la pâte plastique, agissant comme un lubrifiant entre les grains des matériaux constituant le mélange de béton ou de mortier.

Troisième période du durcissement: cristallisation des masses colloïdales et formation d'une pierre dure de ciment.

Le durcissement du ciment Portland est relativement rapide au début de la première période. Ensuite, sa dureté ou résistance croît plus lentement, parce que l'augmentation de la consistance et la cristallisation des formations colloïdales empêchent de plus en plus l'eau de pénétrer dans les parties intérieures des grains de ciment.

On peut accélérer le durcissement du ciment en le broyant plus finement, en augmentant la température et en ajoutant une proportion pondérale de 1 à 2% de certaines substances, appelées accélérateurs (chlorure de calcium, chlorure de sodium, etc.).

Le volume du ciment Portland varie lorsqu'il durcit. Si le durcissement se déroule à l'air, le volume peut diminuer, alors que dans l'eau, il y a toujours un certain gonflement. Le retrait est particulièrement dangereux parce qu'il peut provoquer des fissurations dans le béton ou mortier durci. Pour éviter les déformations dues au retrait, il faut que le durcissement du ciment se déroule en milieu humide, en particulier au début. L'humidité est absolument nécessaire pur un durcissement normal du ciment. Le durcissement du ciment cesse pratiquement dès que l'eau s'évapore.

La réaction entre le ciment Portland et l'eau s'accompagne d'un dégagement de chaleur (phénomène dont il faut tenir compte dans la construction d'ouvrages massifs : fondation en béton, barrages, etc.). Dans de tels ouvrages, la température peut atteindre 70 à 80 °C, ce qui provoque assez fréquemment des fissurations. C'est pourquoi, on ne doit pas employer des ciments qui dégagent beaucoup de chaleur (ciments fortement exothermiques) dans les ouvrages massifs. En hiver, au contraire, un dégagement de chaleur important est favorable aux travaux de construction, car il empêche le béton des ouvrages massifs de geler.

Résistance mécanique du ciment Portland. On définit cette résistance mécanique par la limite de résistance des éprouvettes à la compression. En fonction de cette caractéristique, on distingue plusieurs qualités ou marques de ciment Portland. On désigne ces marques par la limite de résistance à la compression d'éprouvettes cubiques de 7,07 cm de côté préparées avec un mortier sec de ciment de composition pondérale 1 : 3, à l'âge de 28 jours. La limite de résistance à l'age de 28 jours est appelée activité du ciment. En principe, cette activité est toujours supérieure à la marque adoptée. Par exemple, si l'activité d'un ciment est de 546 kg/cm², on donne à ce ciment la marque « 500 ». Ceci doit être très en considération si l'on veut utiliser plus complètement la résistance mécanique d'un ciment (voir p. 177).

Les qualités ou marques prévues pour les ciments Portland sont les suivantes : 300-400-500-600 et 700.

La résistance du ciment Portland dépend en particulier de la proportion d'eau initiale de gâchage et de la finesse de mouture. La résistance est d'autant plus faible, mais par contre la plasticité (viscosité) est d'autant plus élevée, que la quantité d'eau contenue dans le mortier de ciment ayant servi à fabriquer les éprouvettes d'essai est plus grande.

Dans certains pays, on mesure l'activité du ciment Portland sur des éprouvettes en mortier plastique. Il faut alors multiplier l'indice de résistance des éprouvettes plastiques par 1,5 à 1,6 pour avoir l'indice de résistance correspondant mesuré sur les éprouvettes rigides en vigueur en Union Soviétique.

Le ciment Portland doit être broyé assez finement pour que 85% du poids de l'échantillon passe par le tamis 008.

On sait que la résistance mécanique et la vitesse de durcissement augmentent avec la finesse de broyage. On utilise cette propriété dans la pratique pour obtenir des ciments à prise rapide.

La vitesse d'augmentation de la résistance d'un ciment Portland n'est pas constante avec le temps. On peut voir sur la figure 52 qu'après 3 jours de durcissement, un ciment Portland atteint la moitié de la résistance mécanique à 28 jours, et que cette résistance ne fait que doubler pendant les 25 jours qui restent. Néanmoins, la résistance à 28 jours n'est pas la résistance définitive, de même que pour tous les autres liants hydrauliques. Dans des conditions favorables, le durcissement d'une pierre de ciment ou d'un béton se poursuit pendant plusieurs années, et la résistance définitive peut être plusieurs fois plus grande que celle à 28 jours.

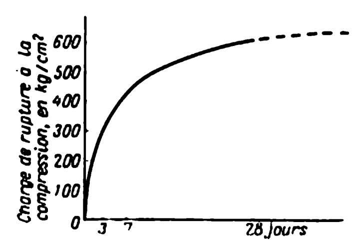


Fig. 52. Courbe d'accroissement de la résistance du ciment Portland

D é l a i s d e p r i s e. On distingue le début et la fin de prise du ciment. Le début de prise est la première période durant laquelle la pâte de ciment perd sa fluidité, la fin de prise étant caractérisée par un certain durcissement.

Le début de prise du ciment Portland ne doit pas commencer avant 45 minutes, et la fin ne doit pas se trouver au-delà de 12 heures. Les entrepreneurs du bâtiment doivent toujours connaître le délai de prise du ciment qu'ils emploient, car ils ne peuvent transporter et employer les bétons et mortiers frais qu'avant le début de prise du ciment. Si cette condition n'est pas respectée, les mortiers et les bétons auront une faible résistance mécanique (voir chapitre «Bétons» p. 173).

Les délais de prise diminuent quand la température augmente, et augmentent quand la température diminue. Ils dépendent également de la finesse de mouture du ciment et de la quantité d'eau employée pour préparer la pâte. La durée de la prise ralentit quand la proportion d'eau dans la pâte augmente.

E n d u r a n c e o u s t a b i l i t é d u c i m e n t P o r t l a n d. On emploie les bétons de ciment Portland dans les conditions les plus diverses : à l'air, dans l'eau, dans des conditions de gel et de dégel, aux températures élevées. Il faut savoir comment se comportent les bétons de ciment Portland dans chacun de ces cas, et quelles sont les mesures à prendre pour accroître la durée des constructions en béton. Il faut donc connaître, en particulier, la résistance dans l'eau, au gel et à la chaleur.

R é s i s t a n c e d u c i m e n t P o r t l a n d d a n s l ' e a u. On distingue trois genres de détériorations ou corrosions du ciment Portland employé dans l'eau, suivant certains indices caractéristiques.

La *corrosion du premier genre* se manifeste en présence de l'eau douce (de faible dureté momentanée), quand les composants de la pierre de ciment sont dissous et entraînés par l'eau d'infiltration. L'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$, produit par l'hydrolyse du silicate tricalcique, est particulièrement soluble dans l'eau douce. La dissolution de l'hydroxyde de calcium et son élimination de la pierre de ciment ont pour effet de décomposer une nouvelle portion de la pierre de ciment durcie, et par suite, de détruire progressivement l'ensemble du béton.

Pour accroître la résistance du ciment dans l'eau douce, on emploie des additions minérales actives (hydrauliques) qui agglomèrent la chaux qui se désagrège en hydrosilicates de calcium insolubles.

La *corrosion du deuxième genre* résulte de l'action des eaux contenant des combinaisons chimiques qui réagissent avec la pierre de ciment. Les produits ainsi formés sont soit facilement dissous et entraînés par l'eau, soit désagrégés sous la forme de masse amorphe ne possédant plus les propriétés d'un liant. Un exemple de ce genre de corrosion est l'effet produit sur la pierre de ciment par des eaux qui contiennent des sels de magnésium :

$$Ca(OH)_2 + MgCl_2 = CaCl_2 + Mg(OH)_2.$$

La réaction entre l'hydrate de chaux qui se dégage au durcissement du ciment Portland et le chlorure de magnésium donne un chlorure de calcium très soluble et un hydrate de magnésium, résidu amorphe n'ayant plus les propriétés d'un liant. On peut également protéger le ciment Port-

land contre ce genre de corrosion en employant des additions hydrauliques.

La *corrosion du troisième genre* résulte du fait que les pores de la pierre de ciment se remplissent progressivement de sels peu solubles, qui cristallisent ensuite en augmentant de volume, et par suite, tendent à briser les parois des pores qui les empêchent de cristalliser. La corrosion de ce genre qui est la plus caractéristique résulte de l'action des eaux sulfatées (contenant par exemple du sulfate de calcium) sur la pierre de ciment. Le sulfate de calcium réagissant avec l'aluminate tricalcique forme un hydrosulfoaluminate de calcium :

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaSO_4 + 31H_2O = 3CaO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O.$$

Ce dernier corps cristallise en fixant 31 molécules d'eau, et son volume augmente de 2,5 fois. La nocivité de l'hydrosulfoaluminate de calcium est si grande pour les bétons qu'on l'appelle « le bacille ou microbe du ciment », parce que ses cristaux ressemblent à certains bacilles et ont un effet destructeur analogue. Pour protéger le béton contre la corrosion sulfatée, on emploie un ciment Portland ayant une composition minéralogique bien déterminée (voir p. 162, ciment Portland sursulfaté).

Les eaux acides et les eaux basiques ont des effets variés sur la pierre de ciment. Les eaux acides détruisent la pierre de ciment même si la concentration d'acide est faible, parce que l'acide réagit activement avec la chaux. Les bases faibles n'ont pas d'effet nocif sur la pierre de ciment ; mais à concentration importante, les bases commencent à dissoudre la silice (SiO_2), et par suite à détériorer la pierre de ciment.

Les hydrocarbures (essence, pétrole) ne sont pas dangereux pour le ciment Portland.

R é s i s t a n c e à l a c h a l e u r. Dans un milieu sec, la pierre de ciment ne subit aucune altération physico-mécanique au-dessous de 70 °C environ. Au-delà de cette température, une action prolongée de la chaleur influe sensiblement sur la résistance mécanique de la pierre de ciment. A 200 °C par exemple, la résistance mécanique d'un béton Portland diminue d'environ 50% et ne se rétablit pas avec l'élimination de la source de chaleur. Si la température augmente davantage, la résistance mécanique continue à diminuer. A une température de 500 à 550 °C suivie

d'une humidification, la pierre de ciment se détériore complètement. Le mouillage de la pierre de ciment provoque une deuxième extinction de la chaux à l'intérieur de la pierre de ciment et sa destruction.

La résistance à la chaleur d'un béton augmente si l'on fixe la chaux $Ca(OH)_2$ dans une combinaison chimique, par exemple dans des hydrosilicates $CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$. Les additions hydrauliques remplissent ce rôle de liant avec succès. Depuis peu, on a créé des ciments permettant de préparer des bétons qui résistent à une température jusqu'à 1300 °C.

A p p l i c a t i o n s. Le ciment Portland est le plus important des liants que l'on emploie dans les constructions en béton et en béton armé. Il occupe la première place parmi tous les ciments, grâce à ses innombrables applications, à sa propriété de durcir assez rapidement à l'air et dans l'eau, au fait qu'il protège les armatures du béton armé contre la corrosion, et aussi grâce à sa haute résistance mécanique. Les domaines d'emploi du ciment Portland sont très étendus et variés.

On emploie le ciment Portland pour préparer les bétons et mortiers des super et infrastructures, des constructions immergées. Il faut tenir compte ici des risques de corrosion du ciment Portland dans des eaux qui contiennent des substances agressives.

Le ciment Portland est essentiellement employé dans la fabrication des éléments et pièces préfabriqués en béton et en béton armé.

Le ciment Portland étant le liant le plus demandé, les entrepreneurs du bâtiment doivent donc l'employer judicieusement et le remplacer chaque fois que cela est techniquement possible par d'autres liants moins chers et efficaces (chaux, ciment mixte). Il ne faut pas employer le ciment Portland pour fabriquer des pièces non sollicitées par de fortes charges.

c) Ciments Portland spéciaux

Les ciments Portland spéciaux diffèrent des ciments Portland ordinaires par des propriétés particulières, ou par le fait que certaines propriétés sont plus accentuées. Par exemple, le ciment Portland sursulfaté possède une plus grande résistance aux eaux sulfatées ; le ciment

Portland plastifié donne une plus grande plasticité aux bétons ; le ciment Portland blanc a une blancheur plus marquée, etc. Les propriétés particulières des divers ciments déterminent leurs applications.

La nomenclature des ciments Portland spéciaux est très étendue. Parmi ceux qu'on emploie le plus dans la construction on peut citer le ciment prompt, le ciment hydrophobe et plastifié, le ciment sursulfaté, le ciment routier, le ciment blanc et les ciments colorés.

On ne doit employer les ciments spéciaux que lorsque leurs propriétés particulières peuvent être mises à profit avec le maximum d'efficacité.

Ciment Portland prompt. Pour fabriquer en série les pièces préfabriquées en béton et en béton armé, on a besoin de ciments pouvant communiquer en un ou deux jours, en conditions normales, une forte résistance mécanique aux bétons (plus de 50% de la résistance nominale à 28 jours). L'emploi des ciments prompts permet d'accélérer considérablement la fabrication, et dans bien des cas d'éviter le traitement par la chaleur et l'humidité pour accélérer le durcissement, opération onéreuse demandant une importante main-d'œuvre (p. 246).

On peut accélérer le durcissement du ciment Portland par plusieurs procédés : choisir une composition appropriée du clinker, broyer le ciment plus finement et ajouter des accélérateurs chimiques de durcissement.

Parmi les divers composants minéraux du clinker du ciment Portland, le silicate tricalcique et l'aluminate tricalcique ont pour effet d'accélérer l'augmentation de la résistance du ciment au début de la période de durcissement. L'augmentation de la proportion de ces composants dans le clinker permet donc d'obtenir des ciments prompts. Toutefois, une forte proportion d'aluminate tricalcique (plus de 10%) nuit parfois à la résistance du ciment au gel, en particulier si le broyage a été fin.

L'augmentation de la finesse de mouture du ciment accélère fortement le durcissement. Cela tient à ce que l'augmentation de la surface de la poudre de ciment accroît parallèlement la vitesse de réaction entre les particules de ciment et l'eau. Il faut remarquer qu'à partir d'une très grande finesse de mouture (moins de 1% de résidus laissé sur un tamis à 4 900 mailles par cm^2), une faible augmentation complémentaire de la résistance mécanique ne justifie

pas les dépenses d'énergie électrique. Pour obtenir un ciment encore plus fin, on se sert de vibrobroyeur.

Ciments Portland hydrophobes et plastifiés. On emploie dernièrement dans les travaux de construction les ciments hydrophobes et les ciments plastifiés. Ces ciments sont caractérisés par une proportion pondérale de 0,15 à 0,25% de substances tensio-actives.

On obtient le ciment Portland hydrophobe en ajoutant un produit gras au clinker au cours du broyage de ce dernier. Ce produit gras, l'oléine, est ajouté dans la proportion de 0,05 à 0,15% du poids de ciment. Il enrobe d'une pellicule extrêmement mince les grains de ciment et les rend ainsi étanches à l'humidité de l'air. Il en résulte que la résistance mécanique d'un ciment hydrophobe ne diminue pas après un entreposage de longue durée, ou encore au cours d'un transport par eau. Cette pellicule protectrice se sépare aisément des grains de ciment quand on brasse les mortiers ou les bétons et n'a aucun effet nuisible sur leur résistance mécanique.

L'addition de l'oléine réduit également le frottement entre les particules et donne à un mortier de ciment une plus grande fluidité pour une même quantité d'eau. Lorsqu'on prépare des bétons ou des mortiers ayant une fluidité déterminée en utilisant un ciment hydrophobe, on peut réduire la proportion d'eau, et réduire également quelque peu la quantité de liant.

On prépare les *ciments Portland plastifiés* en ajoutant au clinker broyé (ou même directement au béton) des concentrés d'une bouillie de sulfite et d'alcool, dans la proportion de 0,15 à 0,25% du poids de ciment. Les pellicules extrêmement minces de cette substance qui recouvrent les grains de ciment accroissent la mobilité des bétons, ce qui permet en définitive d'économiser du ciment. Cette économie peut atteindre 8%.

On emploie également les additions tensio-actives pour améliorer les propriétés d'autres catégories de liants afin de réduire la consommation de ces liants dans les bétons et les mortiers.

Les bétons fabriqués avec des ciments hydrophobes et des ciments plastifiés résistent mieux au gel et leur imperméabilité à l'eau augmente. Ces ciments sont recommandés pour les bétons résistant bien au gel et imperméables à l'eau.

Ciments Portland sursulfatés. Comme l'indique son nom, le ciment résistant aux sulfates oppose une forte résistance à l'action des eaux sulfatées. On obtient ce résultat en réduisant dans le clinker la quantité de matières minérales qui réagissent avec les substances contenant des sulfates (par exemple, $CaSO_4$). Suivant la théorie de la corrosion de troisième genre du ciment Portland, les « bacilles du ciment » sont le résultat de la réaction entre le sulfate de calcium contenu dans l'eau et l'aluminate tricalcique, qui est un composant minéral du ciment Portland. Il en résulte que les « bacilles du ciment » ne peuvent pas apparaître si le clinker ne contient pas cet aluminate. Un tel ciment résistera bien aux eaux sulfatées. Le ciment Portland sursulfaté diffère du ciment ordinaire par la proportion d'aluminate tricalcique qui, dans le clinker de ce ciment, ne doit pas excéder 5%. Dans un ciment ordinaire, au contraire, cette proportion atteint parfois 10 à 12%.

La fabrication et les propriétés du ciment Portland sursulfaté ne diffèrent pas de celles du ciment Portland ordinaire, mais le premier résiste beaucoup mieux à la corrosion en conditions humides. Les résistances du ciment Portland sursulfaté varient de 400 à 600. Ce ciment est très employé dans les ouvrages hydrotechniques, ainsi que dans les constructions en béton et béton armé exposées à la fois à l'action des eaux sulfatées, à des mouillages et séchages alternatifs systématiques, ou bien à des gels et dégels consécutifs.

Les *ciments Portland blancs et colorés* sont employés pour la décoration, dans les travaux du second œuvre à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments et des locaux, ou encore pour fabriquer des objets sculptés.

On obtient le ciment blanc en ajoutant à la matière première une très faible quantité d'oxyde de fer ou d'autres oxydes colorés. On fabrique les ciments colorés en broyant du clinker de ciment blanc avec des pigments minéraux clairs et résistant aux alcalis : ocre, minium de fer, etc.

Le *ciment Portland pour routes* diffère du ciment ordinaire par sa forte résistance au gel et sa grande résistance à l'usure due à la fois aux coups et aux frottements, facteurs qui caractérisent les conditions de service des revêtements routiers. La résistance de ce ciment à la flexion est généralement égale au moins à 40 kg/cm^2. La résistance de ce ciment ne doit pas être inférieure à 500.

On donne à ce ciment une résistance élevée au gel, en réduisant la proportion d'aluminate tricalcique jusqu'à 4 à 6% (limite admissible 10%) et la proportion des additions hydrauliques à 5-7% (limite admissible 15%). Ces dernières substances réduisent également la résistance du béton au gel, bien qu'elles accroissent sa résistance à l'eau.

On peut obtenir un ciment pour routes ayant une plus grande résistance à l'usure, en augmentant la proportion de silicate tricalcique et d'aluminoferrite tétracalcique.

Ce ciment se distingue également par un début de prise plus tardif. En principe, la prise ne commence pas avant les deux heures qui suivent le gâchage. Ceci est conforme aux impératifs des travaux routiers.

d) Ciments pouzzolaniques

Les *ciments pouzzolaniques* sont des ciments qui contiennent des additions minérales actives (additions hydrauliques).

Ces additions (précédemment appelées pouzzolanes) n'ont pas par elles-mêmes la propriété de durcir. Gâchées avec de l'eau, elles ne prennent pas prise et ne passent pas à l'état pierreux. Cependant, un mélange de pouzzolane avec certains liants contenant de la chaux à l'état libre ou produisant de la chaux par réaction avec l'eau, a la propriété de durcir de lui-même dans un milieu aqueux.

On trouve l'oxyde de calcium à l'état libre dans des liants tels que la chaux aérienne et la chaux hydraulique, mais le ciment Portland est un liant qui produit de la chaux libre quand il durcit. Cela permet de distinguer deux groupes de ciments pouzzolaniques : les ciments Portland pouzzolaniques et les ciments pouzzolaniques à la chaux.

Les additions hydrauliques sont des roches ou des déchets industriels qui sont broyés finement et qui, lorsqu'on les mélange avec de la chaux aérienne, lui donnent la propriété de durcir dans l'eau.

Ces additions comprennent principalement de la silice et de l'aluminate actives, qui ont la propriété de réagir avec la chaux en conditions ordinaires. Ces réactions forment des hydrosilicates et des hydroaluminates de calcium.

Les additions hydrauliques naturelles comprennent également les cendres volcaniques, le tuf, le trass, la pierre ponce, la diatomite. la terre d'infusoires. Les additions

artificielles comprennent les cendres et scories de combustion, les laitiers granulés des hauts fourneaux, l'argile cuite, etc.

Les laitiers granulés des hauts fourneaux et certaines cendres de schistes combustibles possèdent dans une certaine mesure la propriété de durcissement hydraulique à l'état finement broyé.

Ciment Portland pouzzolanique et ciment Portland de laitier

Le ciment Portland pouzzolanique est un liant hydraulique que l'on prépare en broyant le clinker de ciment Portland avec une addition minérale active d'origine naturelle.

La proportion d'addition minérale varie de 20% à 45% en fonction de la nature de cette substance, de ses propriétés et de la qualité du ciment que l'on veut obtenir.

Dans la fabrication du ciment Portland de laitier, l'addition minérale active est constituée par le laitier granulé des hauts fourneaux dont la proportion dans le ciment varie de 20 à 85%, mais généralement, entre 40 et 70%.

La réaction entre la silice active et la chaux libérée du clinker forme de l'hydrosilicate de calcium qui est une combinaison peu soluble :

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + nH_2O \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot (n+1)H_2O.$$

Lorsque le ciment Portland contenant une addition hydraulique active durcit, la quantité d'hydroxyde de calcium diminue donc fortement, ce qui accroît la résistance de ce ciment dans l'eau douce.

Propriétés. La finesse de mouture et les durées de prise de ces ciments ne diffèrent pas de celles du ciment Portland ordinaire.

Ces ciments sont très inférieurs au ciment Portland ordinaire en ce qui concerne la vitesse de durcissement. Le durcissement est particulièrement lent pendant les premiers jours, mais au bout de 28 jours, la résistance est presque la même que celle d'un ciment Portland ordinaire.

Les marques des ciments Portland pouzzolaniques et des ciments Portland de laitier sont les mêmes que celles du ciment Portland ordinaire, exception faite pour la marque 700.

Le durcissement des ciments en question se ralentit au-dessous de 10 °C. Inversement, le durcissement de ces

ciments est rapide lorsqu'on traite les pièces thermiquement (étuvage).

Les ciments Portland de cette catégorie dégagent moins de chaleur que les ciments Portland ordinaires parce que les premiers contiennent peu de clinker dont l'hydratation s'accompagne d'un dégagement de la chaleur. La faible exothermicité de ces ciments Portland permet de les employer très largement dans les ouvrages massifs.

Corrosion. La résistance des ciments Portland pouzzolaniques et de laitiers dans l'eau douce est majorée parce que ces ciments ne contiennent pas de chaux libre. En outre, la silice de l'addition réagit avec l'aluminate tricalcique et le transforme en aluminate bicalcique. La diminution de la teneur en aluminate tricalcique accroît la résistance des ciments Portland pouzzolaniques aux eaux sulfatées, la possibilité de formation des « bacilles du ciment » étant réduite.

Mais la résistance au gel de ces ciments est parfois inférieure à celle des ciments Portland ordinaires. Aussi, avant de les employer dans des constructions qui doivent bien résister au gel, il faut faire des essais de résistance au gel sur des éprouvettes de béton.

Applications. On emploie les ciments Portland pouzzolaniques et de laitiers tout comme le ciment Portland ordinaire dans la fabrication des éléments et objets préfabriqués en béton et béton armé, ainsi que pour préparer des mortiers et des bétons. Il ne faut pas oublier que les bétons fabriqués avec ces ciments cessent pratiquement de durcir quand on les emploie en conditions sèches. Pour ne pas nuire au durcissement d'un béton pendant la première période, il faut le mouiller systématiquement et l'empêcher de sécher.

Ciment pouzzolanique à la chaux et ciment de laitier à la chaux

Les ciments pouzzolaniques à la chaux sont des liants hydrauliques que l'on obtient en broyant ensemble ou en mélangeant soigneusement ensemble de la chaux et des additions hydrauliques (à l'état sec), après les avoir transformées en une poudre fine. Le ciment contient 10 à 30% d echaux et 70 à 90% d'additions. On peut employer la chaux

hydratée et la chaux vive. Pour régler la durée de prise, on ajoute jusqu'à 5% de plâtre au cours du brocardage ou du malaxage.

Dans le ciment de laitier à la chaux, les additions sont les laitiers des hauts fourneaux granulés et finement broyés.

On classe les ciments pouzzolaniques à la chaux et les ciments de laitier à la chaux en marques 25, 50, 100 et 150 d'après la charge de rupture à la compression. Les éprouvettes sont préparées avec un mortier sec de 1/3 et essayées à l'âge de 28 jours.

Propriétés. La prise et le durcissement de ces ciments sont le résultat d'une réaction entre la chaux et la silice active de l'addition. Cette réaction, extrêmement lente, produit un hydrosilicate de calcium.

La résistance mécanique des ciments considérés augmente également d'une façon lente. La chaux ne réagit avec la silice qu'en conditions humides. C'est pourquoi on ne doit pas laisser ces ciments se dessécher, en particulier pendant la première période de durcissement.

Le traitement par étuvage concourt tout particulièrement à l'augmentation de la résistance mécanique des pièces réalisées avec ces ciments, alors qu'au contraire, le durcissement s'arrête presque complètement quand la température tombe au-dessous de +10 °C.

Résistance à l'air. Les ciments pouzzolaniques à la chaux peuvent être détruits par l'action de l'air. Cela résulte de la dessiccation de l'hydrosilicate de calcium colloïdal qui au retrait enfreint fortement la cohésion à l'intérieur de la pierre de ciment et provoque des fissurations. L'acide carbonique de l'air, qui détruit l'hydrosilicate, nuit également à ces ciments.

Pour accroître la résistance de ces ciments à l'air, on leur ajoute jusqu'à 10 ou 15% de ciment Portland, ou bien on accroît la proportion de chaux jusqu'à 40 ou 60%. Ceci réduit toutefois la résistance du ciment dans l'eau.

La résistance au gel des ciments pouzzolaniques à la chaux et des ciments de laitier à la chaux est faible. On ne peut donc pas les employer pour les parties d'ouvrages qui, en service, peuvent être soumises périodiquement au gel et au dégel après avoir été saturées d'eau.

Applications. On emploie les ciments pouzzolaniques à la chaux et les ciments de laitier à la chaux dans

les maçonneries des murs et des fondations qui se trouvent en conditions humides ainsi que pour fabriquer des bétons de faible résistance et des pierres artificielles.

Ces ciments sont des liants hydrauliques régionaux bon marché parce que constitués par des minéraux locaux (additions actives) ou des déchets industriels (laitiers, débris de briques, cendres).

Ciments de laitier sulfatés

Après gâchage, les laitiers granulés broyés des hauts fourneaux ont la propriété de durcir, mais ce durcissement est extrêmement lent. Pour l'accélérer, on ajoute aux laitiers diverses substances minérales : dolomite cuite, plâtre, anhydrite, ciment Portland, etc. Un de ces ciments est le ciment de laitier sulfaté. C'est un liant hydraulique que l'on obtient en broyant finement les laitiers granulés des hauts fourneaux (80 à 85%) avec de l'anhydrite ou du plâtre (15 à 20%) et du clinker de ciment Portland. La proportion du clinker peut atteindre 5%.

On groupe les ciments de laitier sulfatés en quatre marques, de 150 à 300, en fonction de leur résistance limite à la compression à 28 jours. Ces ciments résistent bien à l'action des eaux sulfatées. Aussi, on les emploie dans les ouvrages hydrotechniques maritimes et dans les structures souterraines soumises à l'action des eaux agressives.

On emploie également les ciments de laitier sulfatés pour préparer des mortiers et des bétons et pour fabriquer des pierres artificielles.

D'une résistance mécanique relativement élevée, le ciment de laitier sulfaté est le liant hydraulique le moins cher du fait que sa composition comprend une matière première locale qui est le plâtre (l'anhydrite) et des déchets métallurgiques, les laitiers. En outre, la fabrication de ce ciment ne nécessite aucun combustible. (La fabrication des autres liants, et en particulier des ciments de laitier à la chaux, nécessite du combustible, ces ciments contenant jusqu'à 30% de chaux que l'on obtient par cuisson d'un calcaire à haute température.)

On ne doit pas ajouter du ciment Portland ou de la chaux à un ciment de laitier sulfaté parce que la corrosion sulfatée risque de détériorer la pierre de ciment.

e) Ciment alumineux

Le ciment alumineux est un liant hydraulique à durcissement rapide que l'on obtient en broyant un mélange brut de chaux et de bauxite cuit jusqu'à fusion ou agglutination.

Les ciments alumineux sont fabriqués avec ou sans additions minérales diverses, en vue d'améliorer leurs propriétés et de réduire leurs prix. On distingue les ciments suivants d'après la nature des additions :

ciments alumineux proprement dits, que l'on obtient par broyage d'un mélange cuit de chaux et de bauxite, sans addition (ces ciments sont les plus répandus de cette catégorie de ciments alumineux) ;

ciments alumineux anhydrites, obtenus par broyage du clinker de ciment argileux avec une addition d'anhydrite ;

ciments alumineux additionnés que l'on obtient en broyant du clinker de ciment alumineux avec une addition constituée par des laitiers de hauts fourneaux ou du sable quartzeux broyé.

Les ciments alumineux proprement dits sont les liants les plus chers. Leur fabrication nécessite une matière première de l'industrie métallurgique, la bauxite extrêmement recherchée. Cette dernière est en effet la matière première de la fabrication de l'aluminium métallique et est constituée principalement par de l'alumine hydratée ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$).

Pendant la cuisson du mélange brut à une température d'environ 1 500 °C, la chaux réagit avec l'alumine. Il y a formation d'aluminate monocalcique, $CaO \cdot Al_2O_3$.

En réagissant avec l'eau de la façon suivante :

$$2(CaO \cdot Al_2O_3) + 11H_2O = 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O + Al_2O_3 \cdot 3H_2O,$$

l'aluminate monocalcique se transforme en hydro-aluminate bicalcique, qui devient compact et cristallise très rapidement. Il en résulte que la résistance mécanique d'un tel ciment augmente en peu de temps. Au bout d'un jour seulement, un ciment alumineux atteint déjà 80 à 90% de sa résistance nominale et atteint sa résistance maximale au bout de 3 jours. Pour cette raison, la marque d'un ciment alumineux est exprimée (à la différence de celle des autres liants hydrauliques) par la résistance limite à la compres-

sion mesurée sur des éprouvettes âgées de 3 jours et préparées avec un mortier sec.

Les marques des ciments alumineux vont de 300 à 500.

Pour mettre complètement à profit la résistance d'un ciment alumineux on le broie plus finement que le ciment Portland, par exemple. Le pourcentage des résidus laissés sur le tamis 008 (mailles de 0,08 mm) ne doit pas dépasser 10%, alors qu'il peut atteindre 15% avec le ciment Portland.

Délais de prise. Le ciment alumineux est un liant qui durcit rapidement, mais dont la prise est relativement lente. Le début de prise doit se manifester 30 minutes après le gâchage, et la fin, 12 heures après le gâchage au plus tard.

Le dégagement de chaleur d'un ciment alumineux est beaucoup plus grand que celui d'un ciment Portand. Cette caractéristique restreint l'emploi des ciments alumineux dans les constructions bétonnées massives mais elle présente des avantages dans les travaux de construction effectués en hiver.

Corrosion. Les ciments alumineux résistent bien à l'action des eaux douces et des eaux sulfatées. Leur durcissement ne produit pas de chaux libre et le clinker ne contient pas d'aluminate tricalcique, générateur de « bacilles du ciment » dans le ciment Portland.

Applications. L'emploi des ciments alumineux est limité par leur prix élevé. Ils trouvent leur application dans les constructions en béton et béton armé utilisant des bétons de haute résistance durcissant rapidement, ainsi que dans les constructions soumises à l'action alternative de l'eau et du gel. Les ciments alumineux sont particulièrement efficaces dans les travaux d'avarie.

La résistance élevée des ciments alumineux aux sulfates permet de les employer pour construire les collecteurs des eaux résiduaires de nombreuses entreprises chimiques et métallurgiques. Les ciments alumineux sont les principaux liants employés dans la fabrication des bétons réfractaires (voir chapitre «Béton»).

Il faut rappeler ici que la chaleur nuit au durcissement des ciments alumineux. A une température supérieure à 25 °C, la résistance d'un béton de ciment alumineux peut même diminuer à l'inverse de ce qui se passe avec un ciment Portland. Aussi, les ouvrages et éléments en béton de ciment alumineux ne doivent pas dépasser 25 °C en cours de durcis-

sement. De plus, on ne doit pas les étuver pour accélérer leur durcissement, comme on le fait pour les éléments contenant d'autres liants hydrauliques.

f) Ciment expansif

Le ciment expansif est un liant hydraulique de composition particulière, qui augmente en volume au cours du durcissement. La découverte de ce ciment a été une grande réalisation de la science soviétique.

Nous avons déjà remarqué que le défaut essentiel de tous les liants hydrauliques est leur retrait. Le retrait résulte des phénomènes physiques et chimiques qui accompagnent la prise et le durcissement. Ce défaut empêche d'obtenir une imperméabilité à l'eau parfaite dans les joints des constructions que l'on remplit avec des liants hydrauliques. Le ciment expansif, en durcissant, ne subit pas de retrait mais augmente même légèrement en volume de 1% à 1,5%, sans produire de fissures. Cela améliore l'étanchéité du béton et son caractère monolithique.

On peut obtenir des ciments expansifs à partir des ciments alumineux ou des ciments Portland. On emploie essentiellement les ciments alumineux qui permettent d'obtenir des ciments expansifs plus stables. Les ciments expansifs fabriqués à partir des ciments alumineux peuvent être des ciments alumineux à la chaux et au plâtre ou des ciments alumineux au plâtre.

Les ciments expansifs se distinguent par une courte durée de prise. On les divise en deux catégories :

à prise rapide, dont la prise commence 5 minutes au plus tôt et se termine 10 minutes après au plus tard ;

à prise ralentie, dont la prise commence 20 minutes au plus tôt et se termine 4 heures après au plus tard.

Les résistances ou marques des ciments à prise rapide vont de 300 à 600, et celles des ciments à prise ralentie de 300 à 500.

On définit la marque d'un ciment à prise rapide d'après la résistance limite à la compression mesurée sur des éprouvettes cubiques de 2 cm de côté. On fabrique ces éprouvettes avec la pâte de ciment. Les marques des ciments à prise ralentie sont déterminées d'après la résistance limite à la compression mesurée sur des éprouvettes en mortier sec de composition 1 : 3.

Le ciment expansif est un type nouveau de liant. On l'emploie pour colmater les joints des canalisations d'eau et d'assainissement, des raccordements des tubings des tunnels du métro, des puits de mines, etc. On l'emploie également pour ancrer les boulons de montage des machines dans leurs fondations, pour remplir les joints et fissures des structures en béton, pour réparer en cas d'avarie les ouvrages hydrauliques, pour les enduits imperméables.

On ne doit pas employer les ciments expansifs pour les structures soumises à une température supérieure à 80 °C, ou les structures soumises à l'action des eaux souterraines.

g) Transport et stockage des liants

L'efficacité d'un liant et l'économie qu'on réalise dans son emploi dépendent beaucoup des conditions de son transport et de son stockage.

Tous les liants subissent une hydratation et durcissent sous l'action de l'eau. Si un liant est exposé à l'humidité en cours de transport ou de stockage, il subit une hydratation prématurée et perd totalement ou partiellement ses qualités de liant. Tous les liants doivent donc être soigneusement protégés contre l'action des eaux atmosphériques et souterraines en cours de transport et de conservation.

Les liants peuvent être transportés soit en vrac, soit en sacs (surtout en papier). On peut adopter le transport en vrac dans des camions spéciaux ou bien en containers.

Les liants ne doivent pas être stockés trop longtemps dans des entrepôts ou magasins. Même en d'excellentes conditions de stockage, les liants perdent, en effet, avec le temps leur activité du fait qu'ils absorbent l'humidité de l'air et s'hydratent donc prématurément.

D'autre part, il ne faut pas oublier que, comme les liants sont des matières pulvérulentes, ils se dissipent facilement en poussière. Il faudra donc, en transportant les liants sur les chantiers, veiller aux pertes.

CHAPITRE VI

BÉTONS

Le béton est le matériau de construction le plus employé actuellement. C'est en béton que sont fabriqués les éléments des bâtiments industriels, édifices publics et immeubles d'habitation, ainsi que des bâtiments agricoles. C'est aussi le materiau de construction le plus employé dans les ouvrages hydrotechniques (barrages, écluses, canaux, quais), les ouvrages d'art et les revêtements routiers. C'est encore en béton qu'on construit les fondations, les réchauffeurs d'air et les enveloppes des hauts fourneaux. On emploie des bétons spéciaux pour la garniture et le revêtement des différents appareils employés en métallurgie et dans l'industrie chimique.

Cette large application du béton dans la construction est due à plusieurs facteurs dont les principaux sont les suivants :

le béton est relativement bon marché parce qu'on se sert essentiellement pour sa fabrication d'agrégats très répandus ;

des méthodes de production peu compliquées permettent d'obtenir des pièces et éléments structuraux résistants de formes et dimensions les plus variées. Ces propriétés donnent au béton un caractère universel que l'on ne peut pas reconnaître, par exemple, aux matériaux céramiques. La nécessité de traitements thermiques compliqués augmente le prix des matériaux céramiques et limite les formes et dimensions des pièces. Par ailleurs, la résistance mécanique des matériaux céramiques est très inférieure à celle du béton.

Pour que les éléments structuraux en béton et en béton armé soient de bonne qualité, il faut qu'ils soient correctement fabriqués. Les bâtisseurs doivent connaître à fond les méthodes de fabrication du béton, savoir choisir les composants de qualité requise pour obtenir des bétons con-

venant à la confection des pièces et éléments les plus variés, et utiliser ces composants en proportions correctes ; ils doivent bien connaître les facteurs assurant un durcissement normal du béton selon son comportement dans chaque cas particulier.

Actuellement, on connaît d'une façon parfaite la technologie du béton et ses applications grâce aux recherches effectuées par les savants de divers pays. La connaissance de la théorie du béton et son application permettent aux bâtisseurs de réaliser en béton des ouvrages durables possédant d'excellentes qualités physiques et mécaniques.

Définition et classification des bétons

Un b é t o n est un matériau pierreux artificiel, obtenu par durcissement d'un mélange rationnellement sélectionné dit mélange de béton, composé d'un liant, d'eau et d'agrégats (ou sans ces derniers).

La figure 53 représente schématiquement la structure d'un béton ordinaire, composé d'agrégats fins et gros (sable, soit cailloux, soit gravier).

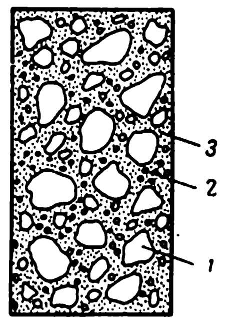


Fig. 53. Schéma de la structure d'un béton
1 — gros agrégats ; 2 — agrégats fins ; 3 — pierre de ciment

Chacun des composants du béton joue un rôle déterminé. Par exemple, le ciment gâché d'eau possède des propriétés adhérantes. La pâte de ciment produite par le gâchage enrobe les grains de sable et de gravier d'une pellicule mince. Après durcissement, les matériaux granuleux que sont le sable et le gravier sont agglomérés en une pierre monolithique et résistante. Outre son rôle de liant, la pâte de ciment joue également le rôle de lubrifiant entre les grains des agrégats. Elle donne en effet au béton une certaine mobilité ou fluidité indispensable pour que le béton remplisse parfaitement les moules dans la fabrication des éléments en béton.

Les agrégats jouent simultanément trois rôles différents dans les bétons :

ils forment un squelette rigide qui s'oppose au retrait du béton, dû à la forte tendance au retrait de la pâte de ciment ;

ils remplacent dans le béton le ciment qui coûte cher ;

ils permettent d'obtenir un béton ayant des propriétés physiques et mécaniques prescrites, selon les propriétés des agrégats mis en œuvre (bétons réfractaire, calorifuge, léger, etc).

Les bétons employés dans la construction sont classés en fonction de leur masse volumique, leur résistance mécanique, leur résistance au gel, leur imperméabilité à l'eau et leur destination.

Selon la masse volumique, on distingue les catégories suivantes de bétons :

b é t o n s o r d i n a i r e s, ou bétons lourds : masse volumique égale ou supérieure à 1 800 kg/m³.

b é t o n s l é g e r s : masse volumique comprise entre 600 et 1 800 kg/m³ ;

b é t o n s c a l o r i f u g e s : masse volumique inférieure à 600 kg/m³.

Selon la résistance à la compression, on classe les bétons en plusieurs marques ou qualités.

Les marques ou qualités suivantes ont été adoptées :

pour les b é t o n s l o u r d s : 25 ; 35 ; 50 ; 75 ; 100 ; 150 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 et 600 ;

pour les b é t o n s l é g e r s : 10 ; 15 ; 25 ; 35 ; 50 ; 75 ; 100 ; 150 ; 200 et 300.

Selon la résistance au gel, c'est-à-dire selon le nombre de cycles de gels et de dégels que le béton peut supporter, on distingue les marques suivantes : 10, 15, 25, 35, 50, 100, 150 et 200.

On distingue, en fonction de l'imperméabilité à l'eau, définie par la pression maximale d'eau aux essais, les bétons qui peuvent supporter au moins les pressions suivantes : 2 kg/cm² (B2) ; 4 kg/cm² (B4) et 8 kg/cm² (B8).

La résistance au gel est un facteur qui doit toujours être pris en compte pour les bétons destinés aux ouvrages soumis à des gels et dégels successifs alors qu'ils sont saturés d'eau. De même, les bétons destinés aux ouvrages sollicités par une pression d'eau (ouvrages hydrotechniques, canalisations, etc.) doivent être imperméables.

Les bétons spéciaux peuvent être mis en œuvre quand les impératifs de résistance mécanique, résistance au gel et imperméabilité à l'eau sont plus sévères.

Pour la fabrication des bétons, toutes les catégories de liants déjà étudiées dans le chapitre précédent sont utilisées.

On classe les bétons en fonction du *genre de liant* employé de la façon suivante :

bétons de ciment, fabriqués à base de liants hydrauliques ;

bétons de plâtre, fabriqués à base de liants de plâtre-anhydrite ;

bétons de silicate (ou bétons de chaux et sable) fabriqués à base de chaux aérienne (parfois hydraulique).

En fonction de l'emploi prévu, on distingue :

bétons ordinaires, pour les éléments structurels en béton ou en béton armé des bâtiments industriels, immeubles d'habitation et édifices publics (fondations, colonnes, poutres, dalles de planchers, fermes, voûtes, etc.) ;

bétons hydrotechniques, pour les barrages, écluses et autres ouvrages analogues ;

bétons routiers, pour les revêtements routiers et sols;

bétons pour les installations sanitaires, et en particulier, les canalisations, réservoirs, puits, etc., en béton et béton armé ;

bétons réfractaires, pour les revêtements des installations travaillant à haute température (fours d'aciérie, foyers industriels, fours de cuisson des matériaux de construction) ;

bétons anti-acides et anti-alcalis, c'est-à-dire résistant aux acides et aux bases, employés pour les revêtements des appareils de l'industrie chimique, pour l'aménagement des sols et les revêtements des murs et plafonds des usines chimiques ;

bétons hydratés, pour la protection contre les radiations dans les réacteurs nucléaires.

§ 1. BÉTONS LOURDS OU ORDINAIRES

Le béton lourd, ou béton ordinaire, est plus employé que les autres bétons dans les constructions industrielles et civiles modernes.

a) Propriétés du béton

Les propriétés d'un béton dépendent beaucoup des propriétés du mélange de béton et de la qualité de sa mise en œuvre.

Le béton doit posséder une fluidité et une plasticité bien déterminées. Ces qualités sont nécessaires pour assurer un remplissage parfait du coffrage ou du moule par le procédé de compaction adopté. D'autre part, le béton ne doit jamais se stratifier, ni avant ni durant sa mise en place.

Un béton doit satisfaire à des conditions déterminées de résistance mécanique (pour un délai de durcissement défini), de durée, de compacité, de résistance à l'eau, etc., selon le rôle qu'il est appelé à jouer dans les structures.

On entend par *résistance mécanique* d'un béton, sa limite de résistance à la compression, mesurée sur des éprouvettes cubiques de 20 cm de côté, conservées à 15 ou 20 °C en conditions humides, jusqu'à l'exécution de l'essai ; de telles conditions de durcissement du béton sont appelées *normales*. Des éprouvettes de 30, 15 ou 10 cm de côté sont également tolérées, mais jamais le plus gros grain des agrégats ne doit dépasser le tiers de la longueur du côté. Lorsqu'on utilise des éprouvettes ayant d'autres dimensions, on rapporte les résultats des essais à l'éprouvette normale, en les multipliant par les coefficients suivants : 1,1 pour le cube de 30 cm de côté, 0,9 pour le cube de 15 cm de côté, et de 0,85 pour le cube de 10 cm de côté.

Dans beaucoup de cas, les résultats des essais à la flexion sont une caractéristique de la résistance du béton non moins importante. On détermine la résistance du béton sous ce genre de charge, en utilisant comme éprouvettes des poutres ou barres de 15 × 15 × 120 cm, ou bien des barres courtes de 15 × 15 × 55 cm. La limite de résistance d'un béton à la compression est généralement 8 à 10 fois plus grande que sa limite de résistance à la flexion.

La marque ou qualité d'un béton est adoptée d'après la limite de résistance de ce béton à la compression à 28 jours d'âge. Comme il a été déjà dit, on a prévu les marques suivantes, dites normalisées, pour les bétons ordinaires : 25 ; 35 ; 50 ; 75 ; 100 ; 150 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 et 600. On ne peut s'écarter d'une marque prescrite que dans le sens de l'augmentation de la résistance ; mais cet écart ne doit pas dépasser 15%. Une majoration excessive de la résistance du béton entraîne une consommation superflue de ciment.

La résistance mécanique d'un béton dépend également des facteurs suivants : activité du ciment, rapport eau/ciment (E/C), composition du béton, qualité des agrégats, procédé

de préparation du mélange, de mise en œuvre et de compaction, âge du béton, conditions de durcissement.

Variation de la résistance mécanique du béton en fonction de l'activité du ciment, du rapport eau/ciment et de la nature des agrégats. L'influence de divers facteurs sur la résistance mécanique du béton a été démontrée pour la première fois à la fin du siècle dernier par I. Maliouga, professeur à l'Académie Technique Militaire de Pétersbourg. Le plus important de ces facteurs est le rapport eau/ciment (E/C), c'est-à-dire le rapport en poids de l'eau et du ciment dans le béton. La résistance mécanique du béton est d'autant plus grande que E/C est plus petit. C'est sur cette relation qu'est fondée la théorie moderne de la résistance du béton.

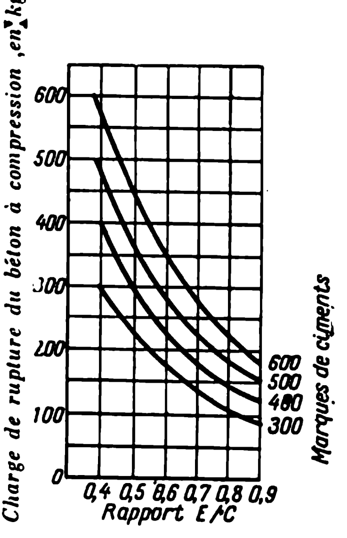


Fig. 54. Variation de la résistance mécanique du béton en fonction du rapport eau/ciment pour diverses marques de ciments

L'influence du rapport E/C sur la résistance du béton est en somme la suivante. La quantité d'eau introduite dans le mélange de béton dépasse toujours la quantité nécessaire à la réaction chimique entre l'eau et le ciment. Cela tient à ce qu'on est obligé de donner au béton une mobilité suffisante pour sa bonne mise en œuvre ; c'est ainsi que la réacton chimique entre l'eau et le béton nécessite de 10 à 20% d'eau en poids du ciment, alors que la proportion d'eau introduite dans le mélange est généralement 40 à 50% ou même davantage. L'eau excédentaire contenue dans le béton en s'évaporant laisse des pores, ce qui réduit la compacité du béton, la section active de la pièce, et par suite sa résistance. La figure 54 représente graphiquement l'influence du rapport E/C sur la résistance du béton.

L'activité du ciment exerce une influence directement proportionnelle sur la résistance mécanique du béton.

La rugosité de la surface des agrégats exerce également une influence favorable sur la résistance mécanique des bétons parce qu'elle améliore l'adhérence entre les agrégats et la pierre de ciment et rend le béton plus monolithe.

La formule empirique suivante exprime l'influence des facteurs précités (activité du ciment, rapport E/C, surface des gros agrégats) sur la résistance des bétons :

$$R_{28} = aR_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right), \text{ en kg/cm}^2, \tag{28}$$

R_{28} étant la résistance du béton à 28 jours d'âge ; a, un coefficient qui tient compte du genre d'agrégat employé. Pour un béton de gravier $a = 0,5$ et pour un béton de pierraille, $a = 0,55$; R_c, activité du ciment.

Cette formule permet de calculer la résistance d'un béton à 28 jours d'âge, quand on connaît le rapport E/C, l'activité du ciment et le genre d'agrégat employé. Mais on ne doit employer de telles formules que pour les calculs préliminaires et approximatifs, car elles ne tiennent pas compte de la composition du béton, de la résistance mécanique des agrégats eux-mêmes et d'autres facteurs qui ont également une influence sur les caractéristiques mécaniques du béton. On obtient des résultats plus exacts avec des graphiques fondés sur des essais d'éprouvettes de 28 jours préparées avec les matériaux dont on dispose et avec divers rapports E/C.

En analysant la formule précédente, il est intéressant de noter qu'elle ne contient aucun coefficient caractérisant la proportion de ciment employé. Autrement dit, d'après cette formule, la résistance d'un béton ne dépendrait pas de la quantité de ciment. C'est en effet vrai dans la gamme des marques de béton le plus couramment employées (de 200 à 300). On peut donc obtenir un béton de résistance prescrite avec une consommation minimale de ciment, ce béton devant toutefois être compact.

On peut obtenir un béton compact et donc très résistant avec une consommation minimale de ciment à condition de choisir convenablement la composition granulométrique des agrégats : il faut que les vides entre les gros grains soient comblés par des grains plus petits. La pâte de ciment sert alors uniquement à enrober la surface des grains des agrégats et pour les agglomérer en une pierre artificielle.

Pour satisfaire à cette condition, on impose des exigences particulières à la composition granulométrique des agrégats. D'autre part, la quantité de pâte de ciment nécessaire à agglomérer les agrégats est d'autant plus faible que la surface spécifique du mélange d'agrégats est elle-même plus faible. On sait que les gros grains ont une surface spécifique plus petite que les grains fins. Il faut donc toujours s'efforcer d'employer de gros agrégats, mais sans perdre de vue qu'il faut obtenir un mélange d'agrégats d'une compacité maximale. La présence de poussière, d'argile, de vase et d'autres fractions fines dans les agrégats accroît considérablement la consommation de ciment ; aussi, les normes limitent la teneur en ces composants (voir plus loin).

La formule de la résistance mécanique des bétons ne contient également pas de facteur se rapportant à la résistance mécanique des agrégats. Cela est justifiable dans une certaine mesure pour les bétons ordinaires (bétons lourds). Mais seulement parce que, pour préparer ces bétons, on emploie des agrégats lourds, constitués par des roches compactes dont la résistance est dans la plupart des cas supérieure à celle des bétons de marques les plus courantes (jusqu'à 200 ou 300).

Par ailleurs, souvent la résistance des agrégats détermine dans une forte mesure celle du béton : si les agrégats ont une résistance trop faible, il devient impossible d'obtenir un béton de la résistance prescrite, ou bien une grande quantité de ciment est nécessaire.

Variation de la résistance mécanique du béton en fonction des délais et des conditions de durcissement. En conditions normales de durcissement, la résistance du béton croît assez rapidement. A 7-10 jours, elle atteint 60 à 70% de la résistance à 28 jours. Ensuite, la croissance de la résistance ralentit et finit par s'arrêter. Ainsi, par exemple, la résistance des éprouvettes âgées de 3 mois est approximativement 25% supérieure à leur résistance à 28 jours, celle des éprouvettes âgées de 12 mois de 75%, celle des éprouvettes âgées de 2 ans de 100%. L'emploi de ciments à prise rapide et de bétons secs permet d'obtenir en vingt-quatre heures des bétons dont la résistance se chiffre à 40-60% de celle à 28 jours.

Pour accélérer le durcissement du béton en conditions ordinaires, on ajoute une faible proportion de chlorure de

calcium et de chlorure de sodium (1,5 à 2% en poids du ciment).

Pour que le béton durcisse normalement, il faut qu'il se trouve dans un milieu fortement humide et que la température ambiante soit positive (15 à 20 °C). Cette forte humidité est destinée à compenser l'évaporation de l'eau nécessaire au durcissement du béton. Pour créer cette humidité, on arrose les éléments bétonnés pendant leur durcissement, ou bien on les recouvre de sciure ou sable humide.

Le durcissement est ralenti quand la température baisse, et il s'arrête pratiquement autour de 0 °C. C'est pourquoi il est nécessaire de réchauffer artificiellement les structures bétonnées en hiver (chauffage à l'électricité et à la vapeur, etc.).

On utilise souvent la propriété que possède le béton de durcir plus rapidement à température élevée dans les usines de préfabrication. Les pièces fraîchement coulées sont étuvées à la pression atmosphérique ou à une pression plus élevée (jusqu'à 8 atm). Les délais de durcissement du béton sont alors sensiblement réduits. Au bout de 10 à 15 heures, le béton atteint une résistance égale à 70-100% de celle du béton à 28 jours en conditions normales de durcissement.

On a actuellement mis au point des procédés qui permettent d'obtenir le béton dit froid, c'est-à-dire un béton qui durcit à des températures bien au-dessous de zéro (—10 à —15 °C). Pour cela, on ajoute au béton une plus grande quantité de chlorure de calcium, de chlorure de sodium et d'autres sels qui abaissent la température de congélation de l'eau contenue dans le béton. Mais une teneur plus grande de ces sels dans le béton a pour effet de corroder les armatures. Aussi, faut-il les employer avec une certaine prudence.

C o m p a c i t é. Le béton est un matériau poreux. Les pores résultent de l'élimination incomplète des bulles d'air lors de la compaction du béton. Ils sont dus également à l'évaporation de l'eau en excédent.

On peut améliorer la compacité d'un béton par une compaction énergique (compaction vibratoire, traitement par le vide) et en choisissant soigneusement la composition granulométrique des agrégats. Dans le même but, on réduit également le rapport E/C, on emploie des ciments et plastificateurs appropriés, qui réduisent la consommation d'eau dans le mélange sans réduire sa mobilité.

Ces mesures ne permettent pas toutefois d'obtenir des bétons absolument compacts. Le béton reste donc un matériau perméable aux gaz. Pour rendre les structures en béton imperméables aux gaz, il faut les maintenir en état saturé d'eau, ou bien les recouvrir de films spéciaux à base de matière plastique ou d'autres matières.

Un béton compact d'une épaisseur suffisante est pratiquement imperméable à l'eau. Pour améliorer l'imperméabilité à l'eau des pièces en béton d'une faible épaisseur, on ajoute au béton, en cours de fabrication, certaines substances hydrophobes spéciales (cérésite, milonaphte, etc.), ou bien on recouvre les surfaces de revêtements imperméables (enduit de bitume, enduit de plâtre compact, etc.).

Le béton compact est également imperméable aux hydrocarbures visqueux, mais l'essence, le pétrole et les huiles légères traversent le béton plus facilement que l'eau. Pour empêcher cette pénétration, on emploie des revêtements spéciaux, films en matière plastique ou autres. On recommande également de recouvrir la surface du béton avec un mortier de ciment expansif.

R e t r a i t   e t   e x p a n s i o n. Le durcissement du béton s'accompagne d'un changement de volume. Quand le béton durcit à l'air, il y a d'abord gonflement pendant les premiers jours, suivi d'un retrait qui va en décroissant pour cesser au bout de 2 à 3 ans. Ce retrait ne dépasse pas généralement 0,15 mm par mètre. En durcissant dans l'eau, le béton ne change pas de volume, ou bien gonfle d'une valeur négligeable. Les variations de volume sont d'autant plus grandes que la proportion de ciment dans le béton est plus élevée. Cela tient à la variation de volume de la pierre de ciment dans le béton, aux actions des forces capillaires accompagnant les variations de l'humidité du milieu et au réchauffage du béton par la chaleur dégagée par le durcissement du ciment lui-même (exothermie). Cette chaleur libérée est particulièrement dangereuse dans les stuctures massives car elle provoque assez fréquemment des fissures dans le béton. On prévient la formation des fissures par des joints de dilatation ou bien en refroidissant les pièces.

Pour réduire le retrait, il faut employer de gros agrégats ayant une bonne composition granulométrique, observer strictement le régime optimal de durcissement, utiliser des ciments faiblement exothermiques et éviter l'emploi

de bétons gras, c'est-à-dire contenant une forte proportion de ciment.

C o r r o s i o n d u b é t o n. On entend par corrosion du béton la propriété qu'il a de se détériorer sous l'effen des conditions de milieu environnant. Le béton se corrode quand les substances agressives pénètrent dans sa masse, et plus encore lorsque ces substances s'infiltrent à travers l'épaisseur du béton. Aussi, l'une des principales mesures de protection du béton contre la corrosion consiste à lui donner une compacité aussi forte que possible. On recommande également de préparer le béton avec des ciments spéciaux (ciments pouzzolaniques, ciments sursulfatés, etc.), qui varient selon les conditions locales.

Pour protéger le béton contre la pénétration des eaux agressives, on recouvre la surface des pièces bétonnées de carreaux céramiques ou de pierres compactes, ou bien on traite la surface avec des substances spéciales qui forment une couche imperméable à l'eau. La corrosion peut également être provoquée par des substances nocives contenues dans les agrégats (impuretés organiques, combinaisons sulfurées). Les agrégats ne doivent donc pas contenir d'impuretés, ou bien n'en contenir qu'une quantité limitée.

R é s i s t a n c e a u g e l. Un béton résistant au gel est un béton qui peut supporter plusieurs cycles successifs de gels et de dégels alors qu'il est saturé d'eau. Les bétons qui doivent être particulièrement résistants au gel sont les bétons destinés aux ouvrages exposés systématiquement à des périodes alternatives d'humidité et de gel (fondations, quais, barrages, etc.). Pour de tels ouvrages, on doit essayer le béton au gel, et il doit supporter durant ces essais un nombre déterminé de cycles de gels et de dégels sans aucun signe de détérioration et sans perdre plus de 25% de sa résistance à l'état saturé d'eau.

La résistance du béton au gel augmente avec sa compacité. On peut également accroître cette résistance en introduisant dans le béton des additions tensio-actives (milonaphte, bouillie de sulfite et d'alcool).

La bouillie de sulfite et d'alcool augmente la mobilité du béton, permettant ainsi de réduire la quantité d'eau, et par suite d'accroître la compacité et l'imperméabilité du béton.

Le milonaphte permet de réduire quelque peu la quantité d'eau ; de plus, il a le pouvoir d'emprisonner l'air dans

le béton sous l'aspect de bulles minuscules. Au cours du durcissement du béton, à la place de ces bulles se forment des pores minuscules qui amortissent pour ainsi dire la pression de la glace qui se forme dans le béton lorsque l'eau gèle.

En outre, le milonaphte rend le béton hydrophobe ; autrement dit, le béton acquiert la propriété de repousser l'eau, ce qui accroît son imperméabilité et sa résistance au gel.

Le genre de ciment et la qualité (résistance au gel) des agrégats employés ont une grande influence sur la résistance du béton au gel. Il ne faut pas oublier que les bétons de ciments pouzzolaniques ont une faible résistance au gel.

E f f e t d e l a c h a l e u r. Le béton est un matériau résistant au feu. Toutefois, l'action prolongée des températures comprises entre 100 et 250 °C réduit la résistance du béton jusqu'à 25%. Un chauffage au-delà de 500 °C suivi de mouillage détruit le béton. La destruction du béton est causée par l'extinction de la chaux libre et déshydratée contenue dans la pierre de ciment. Les structures en béton qui, en service, sont soumises longtemps à des températures élevées doivent donc être protégées par une maçonnerie de briques ; au-delà de 250 °C, il faut employer des bétons réfractaires spéciaux.

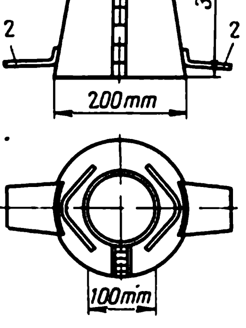


Fig. 55. Moule conique employé pour le slump test

b) Propriétés du mélange de béton

F l u i d i t é. On appelle fluidité d'un béton la propriété du béton de s'affaisser sous son propre poids.

Il existe plusieurs procédés pour évaluer la fluidité d'un béton. Le slump test est très employé dans la pratique pour déterminer le degré de cette fluidité. Ce test est réalisé à l'aide d'un moule métallique sans fond en forme de tronc de cône de 30 cm de haut et 10 et 20 cm de diamètre au sommet et à la base. Ce moule est doté de deux poignées *1* et de deux butées *2* (fig. 55).

On place le cône sur une feuille de tôle métallique ou un morceau de linoléum horizontal, on mouille sa surface intérieure, et l'on coule le béton dans ce moule, en trois couches successives de la même hauteur. Chaque couche est piquée 25 fois avec une tige métallique de 16 mm de diamètre et 60 cm de long à bout arrondi. Le cône une fois rempli, le mélange est aplani au raz des bords. On soulève ensuite le moule par les poignées d'une façon parfaitement verticale et on le place à côté de l'échantillon ou éprouvette de béton ainsi obtenu. Le mélange libéré du moule s'affaisse plus ou moins selon sa fluidité. Le slump mesuré en centimètres caractérise la fluidité du béton.

On distingue les catégories suivantes de bétons en fonction du slump du béton:

b é t o n s s e c s: slump compris entre 0 et 1 cm;
b é t o n s f l u i d e s: slump jusqu'à 18 cm;
b é t o n s l i q u i d e s: slump supérieur à 18 cm.

Le slump test permet de déterminer non seulement le degré de fluidité d'un béton, mais également sa cohésion structurelle, c'est-à-dire le degré de sa plasticité. Tous les bétons doivent être p l a s t i q u e s, quelle que soit leur fluidité. Dans le cas présent, on entend par plasticité la propriété du béton de se déformer sans rupture et sans stratification des composants sous son propre poids ou sous une charge (lorsqu'il est pressé ou vibré). La plasticité est une condition nécessaire à la bonne mise en œuvre du béton. Elle est également nécessaire pour que le béton conserve ses propriétés quand il est transporté.

A la différence des bétons fluides et liquides, les bétons particulièrement secs ne deviennent plastiques que sous une charge (compression ou vibration). Autrement, ils demeurent une masse terreuse humide et non cohésive.

C o u l a b i l i t é. La coulabilité est la propriété que possède un béton de bien remplir le moule sous l'action de vibrations.

On détermine le degré de la coulabilité d'un béton à l'aide d'un instrument spécial — le viscosimètre (fig. 56). L'appareil se compose d'un récipient cylindrique *1* de 300 mm de diamètre et 200 mm de hauteur. Les parois de ce récipient comportent trois encoches en gradins situées à des hauteurs différentes du fond. Dans ces encoches, sur des étriers *3*, on place uu anneau cylindrique *2* de 215 mm de diamètre et de 130 mm de hauteur. Entre le fond du récipient et l'anneau

se forme un vide *9* dont la valeur peut varier selon l'encoche choisie pour fixer l'étrier de l'anneau. Le viscosimètre comprend un statif démontable *4*, qui maintient par l'intermédiaire du guide la tige *5* portant le disque *6*. On place dans

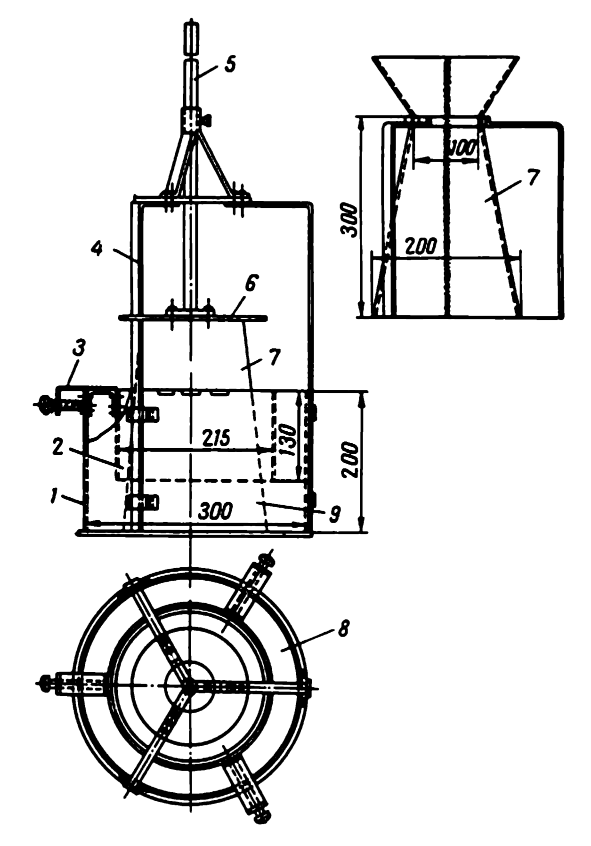


Fig. 56. Viscosimètre technique employé pour mesurer la fluidité d'un béton

ce viscosimètre un moule conique normalisé *7* analogue à celui représenté sur la figure 55.

Pour déterminer la coulabilité, le viscosimètre contenant le moule conique est placé sur un marbre de laboratoire. Par la méthode standard, on remplit de béton le moule, puis on enlève le moule et l'on mesure l'affaissement du cône

de béton. On abaisse ensuite sur le cône de béton le disque avec sa tige, et l'on met en marche la plaque vibrante. Sous l'effet des vibrations, le béton se répand et commence à s'écouler par l'intervalle *9* compris entre l'anneau *2* et le fond du récipient *1* dans l'enceinte *8* limitée par les parois de l'anneau et du récipient. Le disque et sa tige suivent l'affaissement du béton. La tige est marquée d'un trait. Dès que ce trait coïncide avec le plan supérieur de la tête du statif, on arrête la plaque vibrante. A cet instant, le niveau du béton sera le même à l'intérieur de l'anneau et dans l'enceinte comprise entre l'anneau et le récipient.

L'indice adopté pour caractériser numériquement la coulabilité du béton est le temps, mesuré en secondes, écoulé entre les moments de la mise en marche et de l'arrêt de la plaque vibrante durant lequel la tige s'abaisse jusqu'à ce que le trait coïncide avec le plan supérieur de la tête du statif. Au cours de cette opération, le béton prend une position horizontale, et son niveau à l'intérieur de l'anneau et au-dehors de l'anneau s'équilibre.

On peut déterminer la coulabilité d'un béton par un procédé plus simple. On prend un moule cubique de 20 cm de côté, on forme à l'intérieur un cône de béton qu'on soumet à des vibrations jusqu'à ce qu'il s'écoule dans le moule de façon à remplir tous les angles.

La coulabilité et la fluidité d'un béton dépendent des facteurs suivants :

p r o p o r t i o n d'e a u employée pour gâcher le béton ou teneur initiale en eau. Ce facteur est le facteur principal. A toutes conditions égales, la fluidité d'un béton est d'autant plus grande que la teneur en eau est plus élevée. Par ailleurs, la résistance mécanique d'un béton dépend du rapport E/C et ce rapport est constant pour une valeur déterminée de la résistance. En conséquence, la teneur initiale en eau et la quantité de ciment nécessaire pour maintenir constant le rapport E/C sont d'autant plus grandes que la fluidité est également plus grande. C'est pour cette raison que l'on consomme moins de ciment pour préparer les bétons secs ;

c o n s o m m a t i o n e n e a u d'u n c i m e n t. On entend par là la quantité d'eau requise pour obtenir une pâte de consistance normale. Les bétons de ciments qui contiennent des additions hydrauliques poreuses exigent une plus grande quantité d'eau pour une même fluidité ;

t e n e u r e n p â t e d e c i m e n t. L'augmentation de la teneur en pâte de ciment augmente le slump du fait que les grains des agrégats sont mieux lubrifiés et que le frottement entre les grains est réduit ;

g r o s s e u r d e s a g r é g a t s. La fluidité du mélange augmente avec la grosseur des agrégats, pour une même consommation en ciment. Cela tient à ce que la surface globale des grains d'agrégats est d'autant plus petite que le mélange d'agrégats est plus gros. Pour une même consommation de ciment, l'épaisseur de la couche de pâte de ciment sur les grains sera dans ce cas plus grande et le frottement entre les grains des agrégats sera réduit.

Pour ces mêmes raisons, l'augmentation de la p r o p o r t i o n d e s a b l e réduit la fluidité du béton ou bien augmente la consommation en ciment. En effet, pour maintenir la même fluidité, il faut plus d'eau et par suite plus de ciment afin que le rapport E/C demeure constant. La quantité de ciment dans un béton dépend donc de la composition granulométrique des agrégats.

L a r u g o s i t é d e l a s u r f a c e des agrégats accroît le frottement, aussi un béton de pierraille est-il moins fluide qu'un béton de gravier.

C h o i x d e l a f l u i d i t é d'u n b é t o n. Etant donné que la résistance d'un béton dépend de la proportion d'eau dans le mélange, et que d'autre part les bétons secs sont plus économiques, il faut choisir une fluidité du béton aussi faible que possible mais néanmoins assez élevée pour qu'elle permette une bonne mise en œuvre selon le procédé de compaction adopté.

En choisissant la fluidité, on tient compte des dimensions et de la nature de l'ouvrage, de la densité des armatures, du procédé de mise en œuvre et du mode de transport du béton. La compaction par vibrations permet d'employer des bétons plus secs. Aussi, ce procédé est-il très répandu dans les travaux de béton.

On peut accroître la fluidité et la coulabilité d'un béton en ajoutant des additions plastifiées et tenséo-actives (bouillie de sulfite et d'alcool) dans une proportion qui peut atteindre 0,25% en poids du ciment. La bouillie de sulfite et d'alcool est versée dans la bétonnière sous forme de solution aqueuse.

§ 2. MATÉRIAUX SERVANT À PRÉPARER LES BÉTONS LOURDS

Les propriétés d'un béton dépendent beaucoup de la qualité du liant, de l'eau et des agrégats. Ces composants doivent satisfaire à des conditions spécifiées par les normes, en fonction de la destination du béton.

a) Liants

Pour préparer les bétons lourds, on peut utiliser toutes les catégories de liants qui ont été examinées dans le chapitre précédent. On emploie surtout les liants hydrauliques, et en particulier le ciment Portland et ses diverses variétés.

On choisit le ciment d'après les conditions de service de la structure en béton, en fonction des divers milieux agressifs auxquels elle est soumise (diverses variétés d'eau, gaz, chaleur, gels et dégels alternés), selon la résistance mécanique requise, le genre d'ouvrage et les conditions de durcissement du béton.

On choisit la marque de ciment en fonction de la résistance du béton requise, et en vue d'utiliser le plus rationnellement possible l'activité du ciment. Le tableau 11 indique les marques de ciments recommandées pour les bétons d'une résistance donnée.

Tableau 11

Marques des ciments pour bétons lourds

Marques des bétons . .	100	150	200	300 et plus
Marques des ciments (maximum)	300	400	500	600-700

On peut employer des marques de ciments voisines des marques des bétons si, dans la fabrication des pièces, on coule les mélanges de ciment en les compactant, bourrant énergiquement (par vibrations ou compressions). C'est le cas par exemple dans la préfabrication.

La marque de ciment peut parfois dépasser celle qui est recommandée au tableau 11. Pour économiser le ciment dans de tels cas, il faut employer des additions hydrauliques ou inertes finement broyées, et les mélanger au ciment jusqu'à obtenir la marque recommandée. Pour déterminer la quantité nécessaire de ces additions qui doivent être mélangées au ciment, on peut se baser sur la règle approximative suivante : 1% d'addition réduit l'activité du ciment de 1%.

b) Eau pour bétons

L'eau qui sert au gâchage du béton doit contenir peu d'impuretés nocives telles que les acides, sulfates, graisses, huiles végétales, matières sucrées et autres matières organiques. On détermine la proportion de ces impuretés dans l'eau par une analyse chimique.

L'eau qui convient le mieux au gâchage est l'eau potable ordinaire des réseaux de distribution. Il est interdit d'employer les eaux des marais, des exploitations de tourbe et des usines qui sont contaminées par des déchets industriels.

L'eau ne doit pas contenir une forte proportion de sels (5 000 mg/l au maximum) parce que les sels réduisent la résistance du béton, corrodent les armatures dans le béton armé et forment des efflorescences sur la surface.

On contrôle la qualité d'une eau pour la fabrication du béton par des essais comparatifs de résistance mécanique faits sur des éprouvettes en béton. L'eau est considérée comme bonne si les éprouvettes de béton auxquelles elle a servi ont une résistance au moins égale à celle des éprouvettes fabriquées avec de l'eau potable pure, après un durcissement de 28 jours en milieu humide.

c) Agrégats pour bétons lourds

Pour préparer les bétons lourds, on emploie comme agrégats des matières minérales pulvérulentes.

On classe les agrégats de la façon suivante en fonction de la grosseur maximale de grains, de l'origine, de la masse volumique et du traitement préparatoire :

en fonction de la grosseur de grain, on distingue le *sable* (agrégats fins) dont la grosseur varie de 0,14 à 5 mm, et la *pierraille* ou *gravier* (gros agrégats) dont la grosseur varie de 3 à 70 mm. Dans les constructions massives en béton,

on peut employer une pierraille ou un gravier de plus de 70 mm ;

d'après l'origine, on distingue les agrégats n a t u r e l s (que l'on extrait dans des gisements non cohésifs, ou bien que l'on obtient par concassage de roches) et les agrégats a r t i f i c i e l s qui sont des déchets industriels (scories) ou qui sont spécialement fabriqués (kéramsite *) ;

d'après la masse volumique à l'état sec, on distingue les agrégats l o u r d s (masse volumique de 1 000 kg/m³ et plus) et les agrégats l é g e r s (masse volumique inférieure à 1000 kg/m³).

D'après le traitement préparatoire, on distingue les agrégats t r i é s (passés au crible, séparés de certaines fractions ou ayant subi d'autres traitements en plus du lavage) et les agrégats o r d i n a i r e s, qui n'ont pas subi de traitement préparatoire.

S a b l e. Pour fabriquer un béton lourd, on emploie principalement les sables naturels. On classe les sables de la façon suivante, en fonction des conditions de formation :

les s a b l e s p r o v e n a n t d e s r o c h e s qui se trouvent à une faible distance de leur lieu de formation; ces sables ont des formes anguleuses et une surface rugueuse, aussi adhèrent-ils bien à la pierre de ciment dans le béton et donnent un béton très résistant ;

les s a b l e s d e s r i v i è r e s e t s a b l e s m a r i n s qui ont subi pendant longtemps l'action mécanique de l'eau et dont les grains sont arrondis et la surface polie (cette surface adhère moins fortement à la pierre de ciment que la surface rugueuse des sables provenant des roches) ;

les s a b l e s d e s d u n e s, qui sont à grains très fins ; de ce fait, ils conviennent mal en principe à la fabrication du béton ; on ne peut les employer qu'en les mélangeant avec un sable plus gros ;

les s a b l e s c o n c a s s é s, que l'on obtient par concassage du granit, des calcaires compacts et d'autres roches compactes. Les grains de ces sables ont des arêtes vives, et leur surface est rugueuse. Aussi, les sables concassés sont les meilleurs pour la fabrication du béton. Ils ne contiennent aucune des impuretés nuisibles que l'on rencontre assez souvent dans les sables des gisements meubles (gisements

---

* Kéramsite, béton laverneux à gravillons d'agglomérés expansés.

non cohésifs). Mais les sables concassés coûtent plus cher que les autres. Aussi, on ne les emploie que pour fabriquer des bétons de qualité supérieure destinés aux ouvrages délicats.

La qualité du béton ne dépend pas seulement de la composition granulométrique du sable ; elle dépend beaucoup également de la nature et de la quantité de diverses impuretés contenues dans le sable.

Les impuretés nuisibles contenues dans les sables sont le mica, les sulfates et des substances argileuses, pulvérulentes et organiques.

Le mica est constitué par des plaquettes brillantes et polies qui adhèrent faiblement à la pierre de ciment et qui se brisent facilement sous des effets mécaniques ; il en résulte que la résistance du béton diminue si la proportion de mica dans le sable dépasse 0,5%.

Les sulfates, et en particulier le plâtre, sulfate de calcium, corrodent la pierre de ciment si leur proportion dans le sable dépasse 1% (le calcul étant fait en SO_3).

Les particules argileuses, limoneuses et pulvérulentes enrobent les grains de sable et les empêchent d'adhérer à la pierre de ciment.

La proportion admissible de ces dernières impuretés dans le sable dépend de l'emploi du sable. La proportion maximale d'argile et de poussières tolérée dans un sable pour un béton ordinaire ne dépasse pas 5% en poids et elle ne dépasse pas 3% pour les bétons spéciaux et les bétons hydrotechniques résistant bien au gel. Si la proportion d'argile et de poussières dans le sable excède ces tolérances, ce sable ne devra pas être utilisé ou bien devra être lavé dans des machines spéciales. L'argile et les poussières présentes dans le sable réduisent la résistance mécanique et la résistance au gel des bétons, ou bien elles nécessitent une plus grande consommation de ciment si l'on veut conserver les propriétés prescrites du béton.

Les impuretés organiques (résidus végétaux, humus) réduisent considérablement la résistance mécanique du béton. On détermine la teneur en impuretés organiques par une méthode colorimétrique spéciale d'après la couleur du liquide sur un sable immergé dans une solution de soude caustique à 3%. Cette couleur ne doit pas être plus sombre que le jaune clair. Les sables qui sont encrassés par une forte quantité d'impuretés organiques

(si bien que la couleur précitée est plus sombre que le jaune clair) sont lavés avec un lait de chaux puis à l'eau. Avant ces lavages, il faut procéder à des essais de résistance du béton de sable encrassé et de sable lavé pour évaluer l'effet des impuretés du sable sur la résistance mécanique du béton.

La composition granulométrique du sable a une grande importance pour la qualité du béton et la consommation en ciment. Il est préférable d'employer un sable gros, parce que, pour un même volume, la surface globale de ses particules est plus petite que celle d'un sable fin, si bien qu'il faut moins de pâte de ciment pour enrober et faire adhérer les grains.

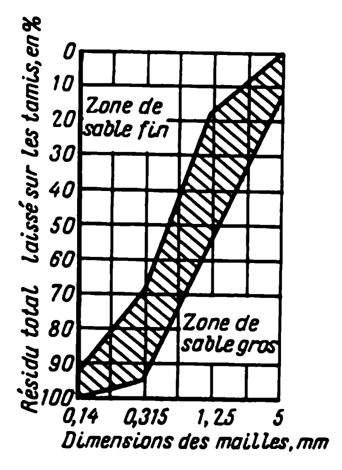


Fig. 57. Graphique de composition granulométrique d'un sable pour bétons lourds

Le volume des vides dans le sable doit être aussi faible que possible, de façon à réduire la consommation de pâte de ciment nécessaire pour combler ces vides. Le volume des vides est minimal si le sable est constitué par des grains de diverses grosseurs, car dans ce cas les intervalles compris entre les gros grains sont comblés partiellement par des grains plus fins.

Pour apprécier un sable au point de vue granulométrique, on utilise l'analyse granulométrique, ou analyse par criblage. On crible le sable à travers une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes, de haut en bas : 10 ; 5 ; 2,5 ; 1,25 ; 0,63 ; 0,315 et 0,14 mm (série standard). Le pourcentage laissé sur le tamis de 5 mm ne doit pas dépasser 10% en poids, et le sable ne doit contenir aucun grain de plus de 10 mm. Après criblage, on obtient sur chaque tamis des résidus «particuliers» de sable. On pèse ces résidus, et on exprime le poids en pourcentage du poids total de l'échantillon (1 kg de sable sec). Ensuite, on évalue les résidus « totaux ». Pour chaque tamis, la fraction totale correspondante est la somme de la fraction arrêtée par ce tamis et des fractions arrêtées par tous les tamis précédents à mailles plus grosses.

Pour apprécier la qualité granulométrique d'un sable, on peut utiliser le graphique de la figure 57. La zone hachurée correspond aux compositions granulométriques du sable les plus avantageuses. Si la courbe de tamisage du sable analysé se trouve dans la zone hachurée, ce sable a en général un faible volume de vides. La courbe de tamisage d'un sable dont la composition granulométrique n'est pas satisfaisante sort de la surface hachurée du graphique, limitée par les lignes brisées supérieure et inférieure. Il faut enrichir de tels sables en leur ajoutant des grains de la grosseur voulue ou bien ne pas employer ces sables. Si on les emploie sans modification, il faudra davantage de ciment pour obtenir un béton compact et un mélange de béton de la fluidité requise.

Pour apprécier la composition granulométrique d'un sable, on a également recours au module de grosseur ou module granulométrique M_g. Le module de grosseur est la somme des résidus totaux laissés sur des tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes : 2,5 ; 1,25 ; 0,63 ; 0,315 et 0,14 mm, cette somme étant divisée par 100.

$$M_g = \frac{A_{2.5} + A_{1.25} + A_{0.63} + A_{0.315} + A_{0.14}}{100}, \qquad (29)$$

le numérateur du deuxième membre étant la somme des résidus cumulés laissés sur les tamis indiqués plus haut.

On distingue les groupes suivants de sable, en fonction du module de grosseur :

sable gros, M_g — 3,5 à 2,4 ;
sable moyen, M_g — 2,5 à 1,9 ;
sable fin, M_g — 2,0 à 1,5 ;
sable très fin, M_g — 1,6 à 1,1 ;
sable extrêmement fin ou poussiéreux, M_g inférieur à 1,2.

On peut utiliser ces derniers sables en des cas exceptionnels, à condition de justifier techniquement et économiquement leur emploi.

Outre le module de grosseur, on peut également apprécier la composition granulométrique d'un sable par le résidu cumulé laissé sur un tamis à mailles de 0,63 mm d'ouverture nette (tamis 063). Pour chacun des groupes de sables précédents, le résidu cumulé laissé sur le tamis de 0,63 mm doit être compris entre les limites suivantes :

sable gros, entre 50 et 75% ;

sable moyen, entre 35 et 50% ;
sable fin, entre 20 et 35% ;
sable très fin, entre 7 et 20% ;
sable extrêmement fin ou poussiéreux, inférieur à 7%.

La masse volumique d'un sable dépend de sa masse spécifique et du volume des vides. Un sable quartzeux courant à l'état meuble a une masse volumique de 1 500 kg/m^3. Après tassement, cette masse augmente jusqu'à 1 600 ou 1 700 kg/m^3.

Fig. 58. Variation du volume de sable en fonction des degrés d'humidité

La masse volumique permet également d'évaluer indirectement la résistance mécanique et la longévité d'un grain de sable. La masse spécifique des sables provenant de diverses roches denses est à peu près la même. La quantité des vides dans les divers sables est également à peu près la même, car elle est déterminée par la composition granulométrique, et celle-ci doit, d'après les normes en vigueur, satisfaire à des conditions déterminées qui sont représentées graphiquement sur la figure 57. Pour une même proportion de vides et une même masse spécifique, le sable le plus résistant et d'une longévité plus grande (c'est-à-dire qui résistera le mieux aux gels) sera celui dont la masse volumique sera plus grande. Un tel sable sera nécessairement constitué par des grains très serrés.

Lorsqu'on porte l'humidité jusqu'à 5 ou 7%, le volume de sable commence à augmenter pour diminuer ensuite et atteindre, complètement saturé d'eau, le volume du sable à l'état sec, ou même un volume inférieur. Il faudra donc réduire d'une manière appropriée le volume mesuré d'un sable humide ou d'un sable gelé à la réception. La figure 58 représente l'effet de l'humidité sur la masse volumique d'un sable.

Au dosage du sable pour préparer un béton, il faut toujours tenir compte de l'eau qu'il contient, afin d'éviter des erreurs dans le choix de la composition du béton.

Graviers. De même que pour les sables, on classe les graviers d'après leur origine, en *graviers provenant des roches*, en *graviers de rivières* et en *graviers marins*. Les graviers de rivières et les graviers marins sont plus propres que les graviers rocheux mais leur surface est polie ce qui réduit quelque peu la résistance du béton.

Impuretés nuisibles dans les graviers. La proportion d'argile et de poussières dans un gravier ne doit pas dépasser 1% ; si cette proportion est dépassée, il faut laver le gravier à l'eau.

La proportion admissible d'impuretés organiques nuisibles dans le gravier est déterminée par la méthode calorimétrique comme pour les sables.

Composition granulométrique. De même que le sable, le gravier destiné au béton doit comprendre des grains de diverses grosseurs, afin de réduire autant que possible les vides. Pour préparer le béton, il est plus avantageux d'employer un gros gravier, parce qu'on diminue ainsi la consommation en ciment, la surface totale des grains étant moins grande. Cependant, la grosseur maximale des grains est limitée par les dimensions des pièces en béton et par la quantité d'armature. La grosseur d'un grain de gravier ne doit pas dépasser le tiers de la dimension minimale de la pièce. Pour les pièces en béton armé, la grosseur d'un grain de gravier ne doit pas dépasser les 3/4 de l'écartement minimal net entre les barres de l'armature. Les graviers de plus de 70 mm de grosseur (jusqu'à 150 mm) sont utilisés pour bétonner les massifs, tels que, par exemple, les ouvrages hydrotechniques.

D'excellents résultats ont été obtenus dans la construction de massifs en employant ce qu'on appelle l'« izioum », c'est-à-dire des blocs pesant jusqu'à plusieurs tonnes noyés dans la masse de béton monolithique. L'emploi de l'« izioum » réduit la consommation en béton et améliore l'imperméabilité de l'ouvrage à l'eau.

On détermine la composition granulométrique du gravier en tamisant 10 kg de gravier moyen et sec à travers une série standard de tamis à mailles de 3 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 et 70 mm et en pesant ensuite les fractions de résidus. On calcule ensuite les résidus cumulés sur chaque tamis, et l'on détermine la grosseur maximale D_{max} et la grosseur minimale D_{min} des grains de gravier. La grosseur maximale

adoptée est la dimension de la maille du tamis supérieur, sur lequel le résidu cumulé ne dépasse pas 5%. La grosseur minimale adoptée est la dimension de la maille du premier tamis à partir du bas, qui ne laisse pas passer plus de 5% de l'échantillon tamisé.

Les résultats de la détermination de la composition granulométrique du gravier sont représentés par la courbe de criblage ou tamisage. Pour tracer cette courbe, on porte en abscisses les dimensions des mailles en mm, et en ordonnées les résidus cumulés sur les tamis, en %.

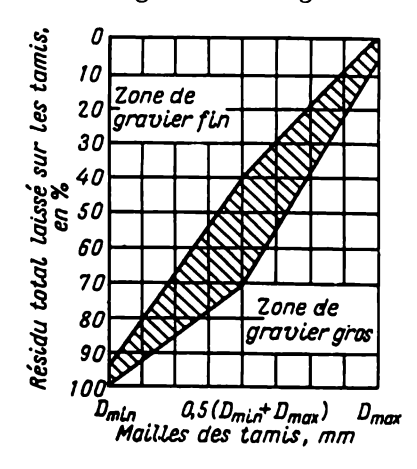


Fig. 59. Graphique de composition granulométrique du gravier et de la pierraille pour un béton lourd

Pour comparer et évaluer la composition granulométrique d'un gravier, on peut se servir du graphique à la figure 59. La zone hachurée de ce graphique correspond aux compositions granulométriques du gravier satisfaisantes.

On éstime que la qualité du gravier est satisfaisante si le volume des vides dans ce gravier ne dépasse pas 45%. Pour réduire la quantité de vides, on peut mélanger en proportions convenables certaines fractions de grains de gravier, ou bien ajouter au gravier les fractions déficitaires.

Pour assurer une composition granulométrique et une homogénéité constante d'un béton au cours d'une construction, il faut trier le gravier ou la pierraille par fractions selon la grosseur des grains et assurer un dosage déterminé des fractions à la préparation du béton.

La résistance mécanique du grain de gravier doit excéder de 20 à 50% celle du béton. Un gravier peut contenir des grains constitués par des roches faibles, c'est-à-dire désagrégées. On détermine la quantité de ces grains par un examen visuel, ou bien en écrasant les grains sous une charge déterminée.

On détermine la résistance mécanique du gravier par des essais d'abrasion effectués dans un tambour à meule ou par des essais aux chocs au pilon.

On contrôle la résistance mécanique de la roche ayant servi de matière première à la pierraille, par des essais à la compression faits sur des éprouvettes sciées dans cette roche et saturées d'eau (cubes de 5 cm de côté, ou cylindres de 5 × 5 cm).

La pierraille doit répondre aux mêmes exigences que le gravier en ce qui concerne la composition granulométrique, la proportion de vides et la résistance au gel.

La résistance mécanique d'un béton dépend beaucoup comme il a été déjà dit des agrégats employés. L'emploi actuel des bétons de haute résistance impose à la pierraille des exigences particulièrement élevées. En particulier, la pierraille ne doit contenir aucune impureté nuisible et doit être triée très soigneusement en de nombreuses fractions.

§ 3. CALCUL DE LA COMPOSITION D'UN BÉTON LOURD

Le calcul de la composition du béton a pour but d'obtenir un béton d'une résistance mécanique et d'une coulabilité donnée, avec une quantité minimale de ciment.

On exprime la composition d'un béton en rapports pondéraux ou volumiques (ces derniers, moins exacts) entre le ciment, dont la quantité est prise pour unité, et les agrégats : sable, gravier (pierraille), soit 1 : S : G. On exprime la proportion d'eau par le rapport E/C. Exemple de composition d'un béton : 1 : 2 : 4, avec E/C = 0,5. On exprime parfois la composition d'un béton par les poids de matériaux employés dans 1 m³ de béton mis en œuvre (tassé).

On distingue deux compositions pour un même béton : la *composition nominale*, calculée pour des matériaux secs, et la *composition pratique* ou *réelle*, dans laquelle on tient compte de l'humidité naturelle des matériaux.

Pour choisir la composition d'un béton, on procède dans l'ordre suivant :

1) on détermine le rapport E/C ou bien le rapport C/E ;
2) on détermine la consommation de ciment et d'eau pour 1 m³ de béton ;
3) on calcule la consommation d'agrégats pour 1 m³ de béton ;

4) on contrôle la fluidité et la coulabilité du béton ainsi obtenu, et l'on corrige les proportions des divers matériaux de façon à obtenir la fluidité désirée ;
5) on détermine la composition nominale du mélange de béton ;
6) on traduit la composition nominale du béton en composition pratique ;
7) on prépare des éprouvettes et l'on contrôle la résistance mécanique du béton en essayant ces éprouvettes.

Détermination de la consommation en ciment et en eau pour 1 m³ de béton. La formule (28)

$$R_{28} = aR_c\left(\frac{C}{E} - 0{,}5\right)$$

permet de calculer le rapport E/C qui correspond à la résistance (marque) du béton.

On détermine ensuite approximativement la proportion d'eau qui donnera un béton suffisamment fluide ou sec.

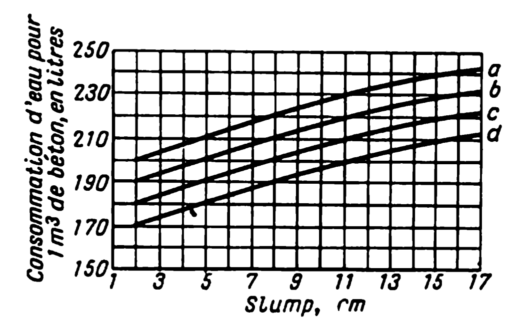


Fig. 60. Graphique de consommation d'eau pour 1 m³ de béton de ciment Portland, sable de grosseur moyenne et gravier de grosseur maximale :

la courbe (a) correspond à un gravier de 10 mm, la courbe (b) à 20 mm, la courbe (c) à 40 mm, et la courbe (d) à 80 mm. Avec un sable fin, la consommation d'eau augmente de 10 litres et avec un gros sable, elle diminue de 10 litres. Avec de la pierraille au lieu de gravier, la consommation d'eau augmente de 10 litres. Avec des ciments mixtes Portland-pouzzolane ou des ciments Portland de laitier, la consommation d'eau augmente de 20 litres.

Pour déterminer la proportion d'eau nécessaire aux bétons secs (affaissement du cône de 0 à 1 cm), on se sert des tables spéciales. Pour les bétons fluides (affaissement du cône supérieur à 1 cm) on peut déterminer la proportion d'eau nécessaire à l'aide du graphique de la figure 60.

Ce graphique a été tracé pour un béton de ciment Portland, à gravier et sable moyens. Si l'on emploie un autre ciment et d'autres agrégats, il faut apporter à la consommation d'eau des corrections appropriées, comme il est indiqué sur la figure 60.

Connaissant la consommation en eau approximative pour obtenir un béton fluide ou sec au degré voulu et connaissant également le rapport C/E, on calcule la quantité approximative de ciment nécessaire pour 1 m³ de béton par la formule suivante :

$$C = E \cdot \frac{C}{E}, \text{ en kg/m}^3. \tag{30}$$

Calcul de la consommation d'agrégats gros et fins. Pour ce calcul, on se fonde sur la condition suivante : la somme des volumes absolus des composants du béton doit être égale à 1 000 litres. Cela correspond à un béton parfaitement compact, et peut être exprimé de la façon suivante :

$$\frac{C}{\gamma_c} + \frac{E}{1} + \frac{S}{\gamma_s} + \frac{G}{\gamma_g} = 1000 \text{ l}, \tag{31}$$

C, E, S et G étant respectivement la consommation en ciment, eau, sable et gravier pour 1 m³ de béton, en kg, et γ_c, γ_s et γ_g les masses spécifiques du ciment, du sable et du gravier.

Le quotient du poids de la matière par la masse spécifique donne le volume de la matière à l'état parfaitement (absolument) compact.

Le total des volumes absolus de ciment, d'eau et de sable exprime le volume absolu du mortier de ciment. Si l'on tient compte que les vides dans les gros agrégats d'un béton parfaitement compact sont remplis par le mortier de ciment on peut écrire que le volume de mortier nécessaire pour 1 m³ de béton est égal au volume des vides dans les gros agrégats employés pour 1 m³ de béton :

$$\frac{C}{\gamma_c} + \frac{E}{1} + \frac{S}{\gamma_s} = V_g \frac{G}{100 \cdot \gamma_{mg}} \cdot \alpha; \tag{32}$$

V_g étant la proportion de vides dans les gros agrégats, en % ;

γ_{mg} la masse volumique des gros agrégats. Le quotient du poids par la masse volumique donne le volume de matière à l'état naturel ;

α le coefficient de relâchement des grains, supérieur à l'unité.

Le coefficient de relâchement des grains tient compte d'une certaine majoration du volume du mortier employé par rapport au volume des vides dans les gros agrégats afin que le mortier relâche quelque peu les grains des gros agrégats et les lubrifie. Cela est nécessaire pour réduire le frottement entre les grains et pour obtenir un béton fluide. Le coefficient de relâchement des grains dépend de la fluidité du béton. Il est compris entre 1,05 et 1,10 pour les bétons secs et entre 1,10 et 1,50 pour les bétons fluides. Le coefficient de relâchement doit être d'autant plus grand que la fluidité du mélange est plus grande.

Pour évaluer la quantité de gros agrégats, on introduit l'expression $V_g \frac{G}{100\,\gamma_{mg}}\,\alpha$ dans la première équation, et l'on obtient ainsi la deuxième équation :

$$V_g \frac{G}{100 \cdot \gamma_{mg}} \cdot \alpha + \frac{G}{\gamma_g} = 1\,000 \text{ l}. \qquad (33)$$

Cette dernière, donne la quantité G de gros agrégats nécessaire pour obtenir 1 m^3 de béton :

$$G = \frac{1\,000}{\frac{V_g \cdot \alpha}{100 \cdot \gamma_{mg}} + \frac{1}{\gamma_g}}, \text{ en kg/m}^3. \qquad (34)$$

Il ne reste donc encore d'indéterminée que la consommation en sable. On peut la déterminer de la première équation par différence :

$$S = \left[1\,000 - \left(\frac{C}{\gamma_c} + \frac{E}{1} + \frac{G}{\gamma_g}\right)\right] \gamma_s, \text{ en kg/m}^3. \qquad (35)$$

Contrôle de la fluidité et de la coulabilité d'un béton. Après le calcul préliminaire de la composition, on prépare pour l'essai environ 10 litres de béton et on détermine le slump et la coulabilité. Si le béton obtenu est moins fluide que requis, on procède à un nouveau calcul en augmentant la quantité de ciment par portions de 10% de la quantité initiale, et l'on ajoute en même temps de l'eau en quantité suffisante pour ne pas modifier le rapport C/E. Si le mélange obtenu est trop fluide, on ajoute du sable et du gravier par portions successives égales à 10% de la quantité initiale, et l'on contrôle chaque fois le slump et la coulabilité.

En sélectionnant une composition de béton, il est recommandé de faire simultanément plusieurs mélanges avec des quantités de sable et de gravier égales à celles calculées, et d'autres avec une proportion de sable majorée et diminuée de 10 et de 20%. On choisit la composition qui correspond à une consommation en ciment minimale pour la fluidité du béton prescrite.

Composition nominale traduite par le calcul en composition pratique. La composition nominale d'un béton est traduite par le calcul en composition pratique, en se fondant sur l'humidité naturelle acquise du sable et du gravier (ou pierraille).

On majore la quantité d'agrégats humides jusqu'à ce que la quantité de matières sèches qu'ils contiennent soit égale à la quantité calculée, et l'on réduit la quantité d'eau introduite dans le mélange d'une valeur égale à la teneur en eau des agrégats.

Contrôle de la résistance mécanique du béton. On prépare des éprouvettes de béton cubiques de 20 cm de côté avec le béton de la composition choisie, tout en le tassant par vibration ou en le piquant. Les éprouvettes doivent être conservées en conditions normales jusqu'au moment des essais.

A l'âge de 28 jours, les cubes sont soumis aux essais à la presse hydraulique. On peut faire ces essais à l'âge de 1 et 3 jours quand les travaux sont urgents ou lorsqu'on emploie des ciments à durcissement rapide.

§ 4. PRÉPARATION ET TRANSPORT DU BÉTON

La préparation d'un béton consiste à doser ses composants et à les brasser jusqu'à obtenir une masse bien homogène.

A l'exception du ciment, on dose les divers matériaux en poids ou en volume. Pour cela, on emploie des appareils de dosage pondéral ou volumique. Le ciment est toujours dosé en poids.

Pour brasser le béton, on emploie des bétonnières à action périodique. Depuis quelques années, on commence à employer des bétonnières fonctionnant en continu.

Les bétonnières sont dotées de tambours d'une capacité (de charge) de 100 à 4500 litres, les bétonnières d'une capacité inférieure à 250 litres étant mobiles, et celles

d'une capacité supérieure étant fixes. Les figures 61 et 62 représentent une vue d'ensemble d'une bétonnière mobile et de bétonnières fixes. On emploie également des bétonnières automotrices (fig. 63) conçues pour préparer le béton en cours de route.

Sur les chantiers modernes, on fabrique le béton dans des centrales spéciales dotées d'un équipement puissant et d'une commande automatique. La figure 64 représente une de ces centrales à béton d'une production annuelle de près de 1 million de m³ de béton. Les grands chantiers de constructions emploient de telles centrales, ou même des centrales encore plus grandes. Ces centrales à béton sont desservies par 9 personnes dont 6 occupées à leur conduite et 3 à leur gestion.

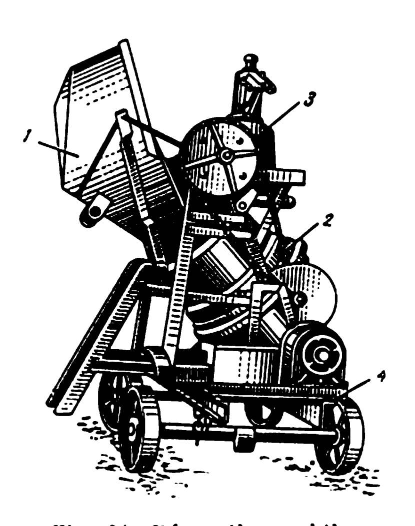


Fig. 61. Bétonnière mobile : 1 — benne d'alimentation 2 — tambour malaxeur ; 3 — réservoir de dosage de l'eau; 4 — cadre et train

Si le volume des travaux de construction est peu important et le chantier situé loin de la centrale à béton, on fabrique directement le béton sur le chantier à l'aide d'installations provisoires.

Dans les bétonnières à action périodique, le béton est malaxé par la rotation du tambour. A l'intérieur du tambour se trouvent des palettes servant au relevage du mélange qui ensuite tombe par gravité et se trouve ainsi malaxé.

Dans les bétonnières continues, le béton n'est malaxé que par les palettes rotatives. Ces bétonnières ont une productivité élevée.

Le volume du béton obtenu après malaxage est toujours inférieur à la somme des volumes des matériaux employés (les vides des gros agrégats sont plus ou moins comblés par les grains plus petits).

Le rapport du volume du béton obtenu à la somme des volumes des matières sèches employées (ciment et agrégats

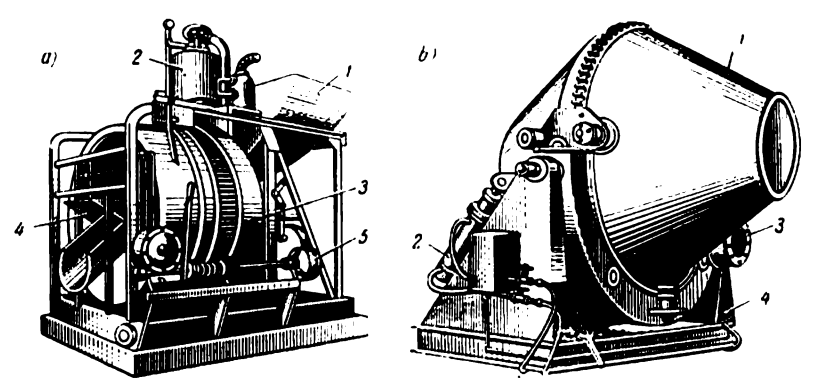


Fig. 62. Bétonnières fixes :
a — à tambour non basculant de 1 200 litres : 1 — trémie de réception 2 — réservoir de dosage de l'eau ; 3 — tambour malaxeur ; 4 — auge de déversement ; 5 — commande
b — à tambour basculant de 2 400 litres : 1 — tambour malaxeur ; 2 — commande d'inclinaison du tambour ; 3 — commande de rotation du tambour 4 — bâti

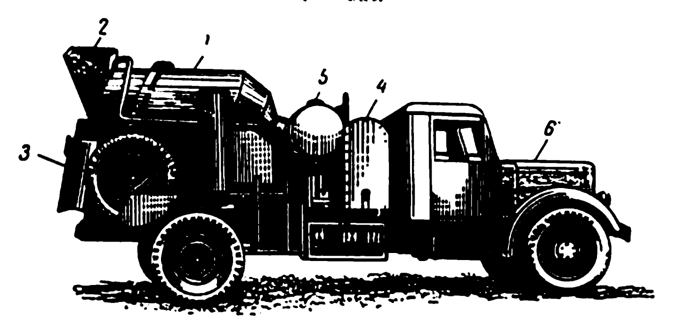


Fig. 63. Bétonnière automotrice :
1 — tambour malaxeur; 2 — trémie d'alimentation; 3 — auge de déversement; 4 — moteur; 5 — réservoir de dosage de l'eau; 6 — camion

fins et gros) est appelé le r e n d e m e n t e n b é t o n. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\beta = \frac{V_b}{V_c + V_s + V_g}, \qquad (36)$$

β étant le rendement en béton ;
V_b le volume du béton à l'état compact, en m^3 ;
V_c le volume de ciment, en m^3 ;
V_s le volume des agrégats fins (sable), en m^3 ;
V_g le volume des gros agrégats, pierraille ou gravier, en m^3.

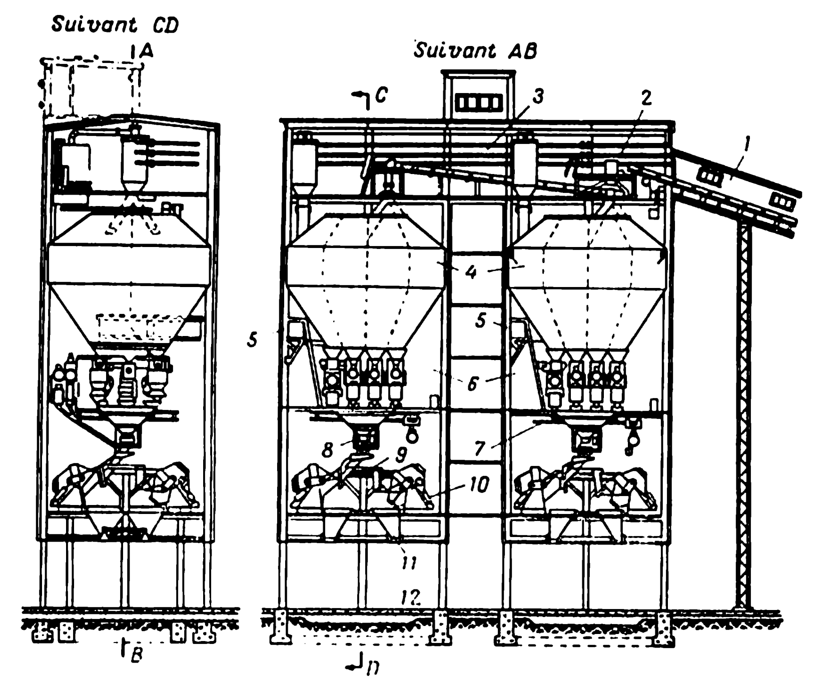


Fig. 64. Installation de malaxage de béton comportant 8 bétonnières de 2 400 litres :

1 — transporteur incliné à bande; 2 — conduite d'alimentation en ciment; 3 — compartiment de rehausse des trémies; 4 — trémies; 5 — réservoirs d'eau; 6 — compartiment de dosage; 7 — registre démontable pour mélange sec; 8 — registre orientable; 9 — dispositif de chargement; 10 — bétonnières; 11 — trémies à béton; 12 — compartiment de répartition du béton

Le poids des matériaux étant connu, le volume de remblayage est obtenu en divisant ce poids par la masse volumique.

Le rendement en béton dépend de la qualité des composants choisis, de la grosseur des agrégats et de la proportion de vides. Le rendement est d'autant plus faible que ces deux dernières valeurs sont plus élevées. En moyenne, le rendement en béton lourd est de 0,68, mais il peut varier entre 0,55 et 0,75.

La qualité de la pâte de béton et la résistance du béton obtenu de cette pâte dépendent de la durée du malaxage, un malaxage insuffisant devant être évité autant qu'un malaxage excessif : dans le premier cas, la pâte ne sera

homogène, alors qu'un malaxage excessif peut provoquer une stratification de la pâte. La durée du malaxage augmente avec la capacité de la bétonnière.

Le béton en provenance de l'installation de malaxage est transporté à pied d'œuvre dans des bennes (mode de transport le plus employé), des wagonnets, des transporteurs, des grues, des pompes à béton, etc.

Si le transport dure longtemps, le béton s'épaissit (sa fluidité diminue) par suite de l'hydratation du ciment, de l'absorption de l'eau par les agrégats et de l'évaporation de l'eau. Le trajet ne doit pas durer plus d'une heure.

§ 5. MISE EN ŒUVRE DU BÉTON ET SON ENTRETIEN

Le béton doit être coulé dans les coffrages et dans les moules de manière qu'aucun vide ne subsiste. Il faut combler tout particulièrement les angles et les endroits étroits du coffrage.

Le béton doit être tassé mécaniquement. On se sert généralement à cet effet de vibrateurs qu communiquent au béton des vibrations d'une haute fréquence (jusqu'à 7 000 vibrations par minute) d'une amplitude de 0,2 à 1,0 mm. Sous l'effet de ces vibrations, le béton se comporte comme un liquide lourd et remplit intégralement le coffrage.

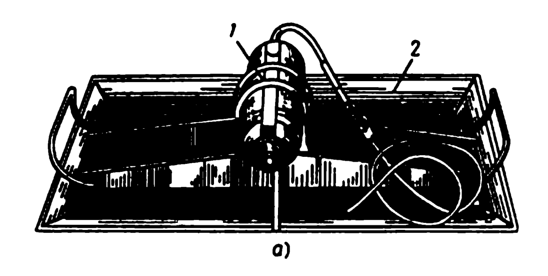
Le béton vibré acquiert une compacité et une résistance mécanique plus grandes que lorsque le béton est mis en œuvre à la main (piquage, damage), ce qui permet de réduire la consommation en ciment.

Selon le mécanisme d'entraînement, on distingue les vibrateurs électromécaniques, électromagnétiques et pneumatiques. Les plus répandus sont les vibrateurs électromécaniques. D'après le mode de vibration, on distingue les vibrateurs superficiels (fig. 65,*a*) et les vibrateurs internes (fig. 65,*b*). Le choix du type de vibrateur à adopter dépend du caractère de la pièce à bétonner: on emploie les vibrateurs superficiels lorsque la couche de béton est peu épaisse (10 à 20 cm au maximum), et les vibrateurs internes lorsque cette épaisseur est plus grande.

On accroît fortement la résistance mécanique du béton en traitant par le vide en même temps qu'on soumet le mélange à des vibrations. La dépression créée par le vide

élimine du béton une partie de l'eau et de l'air excédentaires, ce qui concourt au tassage du béton.

Il faut assurer au béton mis en place, durant son durcissement, une température et une humidité suffisantes ;



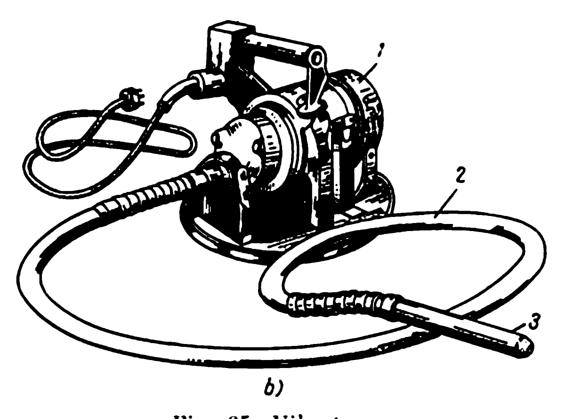


Fig. 65. Vibrateurs :
a — vibrateur superficiel : 1 — moteur, 2 — plan vibrant; b — vibrateur interne : 1 — électromoteur sur plateau, 2 — arbre souple, 3 — sonde vibrante

de plus, il faut le protéger contre toutes perturbations mécaniques.

En été, il faut empêcher le béton de s'assécher. A cet effet, on recouvre sa surface d'une couche de sable, de laitier, de paillasses, etc., et on l'humidifie périodiquement.

Le recouvrement doit être humidifié d'autant plus souvent (3 ou 4 fois par jour) que la température de l'air est plus élevée et que le vent est plus intense. Cela est particulièrement important durant les premiers jours qui suivent la coulée de la pièce.

On recouvre parfois le béton d'une émulsion spéciale formant une pellicule imperméable qui protège très bien le béton contre l'assèchement. Ce procédé est très répandu dans les travaux routiers.

Le durcissement du béton se ralentit à une température inférieure à 10-15 °C pour cesser complètement au-dessous de 0°, l'eau se transformant alors en glace. Un béton qui a gelé avant le début de la prise, se dégèle quand la température remonte, et les phénomènes physiques et chimiques de durcissement reprennent. Si le béton a gelé après la prise, sa résistance mécanique tombera au-dessous de la normale d'autant plus que la gelée s'est produite plus tôt. Cette diminution de la résistance s'explique par le fait que la dilatation de l'eau produite par la gelée détruit les liaisons existant entre les grains d'agrégats et la pierre de ciment incomplètement durcie.

Pour réduire le délai de durcissement (jusqu'à 3 ou 5 jours) on emploie des ciments à haute résistance et à prise rapide ainsi que des bétons secs et l'on tasse fortement ces bétons en les vibrant. En outre, on ajoute des accélérateurs de prise (chlorure de calcium, etc.).

Dans le même but, on produit à l'intérieur du béton une certaine réserve de chaleur, en chauffant préalablement les matériaux (réchauffage de l'eau jusqu'à 80 °C et des agrégats jusqu'à 40 °C), et l'on protège le béton contre un refroidissement rapide en le couvrant avec des matériaux calorifuges (laitiers, paillassons, etc.).

Les pièces minces (plaques, enveloppes, poutres, etc.) sont réchauffées à la vapeur ou à l'électricité. La vapeur est envoyée entre les deux parois d'un coffrage double. S'il s'agit d'un réchauffage électrique, on fait passer le courant électrique dans le béton. La température lors du réchauffage électrique ne doit pas dépasser 60 °C, afin de ne pas dessécher le béton.

Au cours des travaux nécessitant la mise en œuvre de béton, il faut contrôler systématiquement la qualité du béton à toutes les étapes de la fabrication, depuis le contrôle des matières premières jusqu'aux essais des éprouvettes de contrôle. Dans ce but, on prépare des éprouvettes avec le béton coulé dans l'ouvrage, et l'on essaie ensuite ces éprouvettes à des âges différents. Les résultats que l'on obtient ainsi permettent d'évaluer la croissance de la résistance mécanique du béton.

§ 6. BÉTONS LOURDS SPÉCIAUX

a) Béton résistant aux acides

On emploie le béton résistant aux acides, ou béton antiacide, pour diverses éléments structuraux dans l'industrie chimique. Il permet de remplacer des matériaux chers, tel que le plomb, céramique, etc.

On fabrique les bétons antiacides avec des ciments antiacides et des agrégats constitués par des matériaux compacts résistant aux acides (sables quartzeux, pierrailles ou graviers en bechtaounite, quartzite, etc.) mélangés au verre liquide. On ajoute également à la pâte de béton une fraction pulvérulente (de moins de 0,15 mm) préparée en matériaux résistant aux acides.

Composition approximative d'un béton antiacide (en poids) : liant 0,7 à 1,0 ; agrégat pulvérulent — 1 ; sable — 1 ; pierrailles — 2. La quantité de verre soluble utilisée est celle nécessaire à donner au mélange la fluidité désirée.

Le durcissement d'un béton antiacide doit se dérouler dans un milieu chaud et sec. Résistance limite à la compression d'un béton antiacide : environ 120 kg/cm^2 à 4 jours, et 150 kg/cm^2 à 28 jours.

b) Béton réfractaire

On appelle béton réfractaire un béton qui ne se détériore pas et peut encore supporter la charge à des températures élevées, pouvant atteindre 1 600-1 700 °C. On peut fabriquer un tel béton avec un ciment alumineux et des agrégats réfractaires (chamotte, laitiers métallurgiques, etc.). Aux températures de service inférieures à 1 200 °C, on peut remplacer le ciment alumineux par un ciment Portland, moins cher, mélangé à un matériau finement broyé, telle la chamotte, la brique broyée, le quartz, etc.

On emploie le béton réfractaire dans les revêtements intérieurs des fours, des foyers et autres installations thermiques. Il remplace les matériaux réfractaires chers et réduit les délais de construction. Depuis quelques années, on a commencé à employer le béton réfractaire dans les revêtements intérieurs des fours Martin.

Lorsqu'on utilise un béton réfractaire, ne pas oublier que son humidification après une action prolongée des hautes températures peut provoquer sa destruction totale.

c) Bétons pour constructions hydrotechniques ou souterraines

Les bétons destinés aux constructions souterraines et aux constructions hydrotechniques doivent être imperméables à l'eau, résister au gel et à la corrosion dans un milieu aqueux.

Pour obtenir des bétons possédant ces propriétés, il faut employer des ciments appropriés, des agrégats de qualité supérieure et soigneusement triés au point de vue granulométrique, puis préparer et mettre le mélange en place soigneusement et prendre toutes les mesures nécessaires pour que le béton durcisse correctement.

Les ciments qui conviennent le mieux pour préparer les bétons hydrotechniques sont le ciment Portland, y compris ses variétés : ciment Portland de laitier et ciment Portland pouzzolanique. Dans un béton de ciment Portland pouzzolanique il y a réaction entre les additions minérales actives et l'hydroxyde de calcium (produit lors du durcissement du ciment Portland) ; les additions gonflent, rendent le béton plus compact, et la réaction qui lie la chaux libre accroît la résistance du ciment à la corrosion. Les additions de sable quartzeux finement broyé atténuent le caractère exothermique et le retrait du béton.

On majore quelque peu la consommation en ciment dans un béton hydrotechnique (au moins 250 kg/m^3). Le béton est mis en œuvre en le vibrant ; on ajoute des substances plastifiées afin de réduire la consommation en eau et améliorer la qualité du béton.

d) Bétons employés pour la protection contre la radio-activité

L'emploi de l'énergie nucléaire dans des buts pacifiques en Union Soviétique a exigé des recherches de moyens de protection du personnel contre la radio-activité des réacteurs nucléaires des centrales électriques nucléaires, des entreprises de traitement et transformation des isotopes et autres entreprises.

Parmi les radiations produites par une désintégration nucléaire, celles qui présentent le plus grand danger pour les organismes vivants sont les radiations gamma et le rayonnement neutronique.

L'efficacité d'une protection contre les rayons gamma est déterminée par l'épaisseur et le poids de l'enceinte. Il y a encore très peu de temps, les principaux matériaux employés pour la protection contre les rayons gamma étaient des métaux lourds : plomb et cobalt. Mais leur coût est élevé, et de plus le plomb est un métal peu résistant. Il a été établi que la matière qui protège le mieux contre le rayonnement neutronique est une matière dont la composition chimique renferme une grande quantité d'hydrogène. L'eau est la matière qui occupe la première place de ce point de vue. Mais comme sa masse spécifique est faible, une très grande épaisseur est nécessaire si l'on veut se protéger à la fois contre le rayonnement neutronique et le rayonnement gamma ; ceci est compliqué et onéreux.

Le béton ordinaire fabriqué avec du ciment Portland ou avec des ciments et agrégats spéciaux est un matériau qui réunit les deux qualités nécessaires à la protection contre les radiations nucléaires : masse volumique élevée et forte teneur en eau. L'emploi d'un tel ciment permet de réduire l'épaisseur de l'enceinte.

Les agrégats employés pour ces bétons spéciaux sont des matériaux lourds : baryte, minerais de fer, magnésite, limonite, mais aussi les déchets métalliques sous la forme de riblons de fonte, tronçons de barres d'armature, tôles et fers profilés, copeaux métalliques, etc.

Le meilleur liant à employer dans les bétons spéciaux est une substance qui accapare une grande quantité d'eau à la suite du durcissement (ceci accroît la teneur en hydrogène du béton). Une telle substance est l'hydrosulfo-aluminate de calcium :

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O.$$

Comme il a été déjà dit, ce corps est le résultat de la réaction entre le plâtre et l'aluminate tricalcique contenu dans le ciment Portland. C'est pourquoi l'une des catégories de ciments spéciaux contient une forte proportion d'aluminate tricalcique et de plâtre. On ajoute à ces ciments des additions hydrauliques (terre d'infusoires, diatomite, etc.), pour les empêcher de se détériorer spontanément.

En dehors du ciment Portland, on emploie aussi les ciments alumineux, expansifs et sans retrait. Mais le prix de ces derniers liants est élevé.

Pour accroître les propriétés protectrices des **bétons hydratés** (ces bétons sont ainsi appelés parce qu'ils contiennent beaucoup d'eau), on leur ajoute des additions telles que l'acide borique, les sels de lithium qui accroissent la proportion d'hydrogène dans le béton.

La résistance mécanique et la longévité des bétons hydratés sont les mêmes que celles des bétons ordinaires.

§ 7. BÉTONS LÉGERS

Variant la masse volumique des agrégats ou leur teneur, on obtient des bétons d'une masse volumique plus faible que celle des bétons lourds, et par suite ayant de meilleures propriétés calorifuges. Le coefficient de conductivité des bétons légers est inférieur à 0,7-0,25 kcal/m·h·°C. Tout béton léger dont le coefficient de conductivité est inférieur à 0,25 kcal/m·h·°C, fait partie du groupe des bétons calorifuges. La masse volumique de ces bétons est en règle générale inférieure à 600 kg/m^3.

On distingue deux groupes de bétons légers :

les bétons à agrégats poreux et légers : bétons de laitier, bétons de gravillon kéramsite, etc. ;

les bétons caverneux, qui ne contiennent pas d'agrégats ou contiennent une faible proportion de sable (béton mousse, béton au gaz). Ces bétons ne contiennent pas d'agrégats. Le rôle de ceux-ci est rempli par des cellules d'air qui se forment lorsqu'on fabrique les bétons par des méthodes particulières (voir p. 216).

On emploie ces bétons dans les structures qui doivent être légères et avoir une faible conductance (murs et planchers de bâtiments chauffés). Les bétons légers ont un avenir particulièrement brillant dans la préfabrication, où ils servent à fabriquer de grands blocs et panneaux de murs.

a) Bétons légers à agrégats poreux

Les agrégats pour bétons légers peuvent être des agrégats naturels ou artificiels. On extrait les agrégats naturels légers des gisements meubles, ou bien on les prépare en concassant des roches légères et poreuses telles que la pierre ponce, le tuf ou le calcaire coquillier.

On obtient les agrégats légers artificiels à partir des laitiers granulés des foyers de chaudières ou des hauts

fourneaux, ou à partir de matériaux poreux spécialement préparés dans ce but : gravillon kéramsite, pierre ponce de laitier (laitier poreux des hauts fourneaux).

La masse volumique des agrégats légers varie de 300 à 1 000 kg/m³ et leur résistance limite à la compression de 10 à 200 kg/cm².

Lorsqu'on emploie des laitiers de combustion, il ne faut pas oublier qu'ils contiennent une quantité importante de particules de charbon non brûlées (souvent jusqu'à 20 ou 30%), de la chaux non éteinte et des sels solubles qui nuisent à la qualité du béton. Les laitiers de combustion doivent être conservés à l'air pendant un certain temps pour éteindre la chaux ; ils ne doivent pas contenir plus de 5 à 15% de particules de charbon (en poids), suivant la catégorie du laitier et la destination du béton.

Propriétés des bétons légers. La masse volumique et la conductance sont les propriétés les plus importantes des bétons légers, outre les propriétés qui sont analogues à celles des bétons ordinaires (résistance mécanique donnée, longévité et fluidité du béton).

En principe, la résistance des bétons légers dépend des mêmes facteurs que la résistance des bétons ordinaires, c'est-à-dire de l'activité du ciment et du rapport E/C. On peut exprimer la résistance mécanique par une formule empirique analogue à celle que l'on emploie pour les bétons lourds et qui est applicable entre certaines limites :

$$R_{28} = aR_c\left(\frac{C}{E} - c\right), \tag{37}$$

R_{28} étant la résistance limite à la compression à 28 jours d'âge, en kg/cm² ;
R_c l'activité du ciment, en kg/cm² ;
a et c les coefficients numériques ayant les valeurs suivantes : $a = 0{,}25$ et $c = 0{,}15$ pour les bétons les plus légers, et $a = 0{,}4$ et $c = 0{,}25$ pour les bétons plus résistants.

La résistance d'un béton léger est d'autant plus grande que la masse volumique est plus grande ou, ce qui revient au même, que le rendement en béton est plus faible (fig. 66). La compacité maximale d'un béton correspond à une certaine consommation en eau optimale. La compacité du béton diminue aussi bien quand la consommation en eau est excédentaire que quand elle est insuffisante.

La résistance mécanique d'un béton léger augmente avec la proportion de ciment, mais la masse volumique augmente en même temps.

La résistance mécanique des agrégats légers a une grande influence sur la proportion de ciment quand on veut obtenir un béton d'une résistance donnée. La résistance mécanique

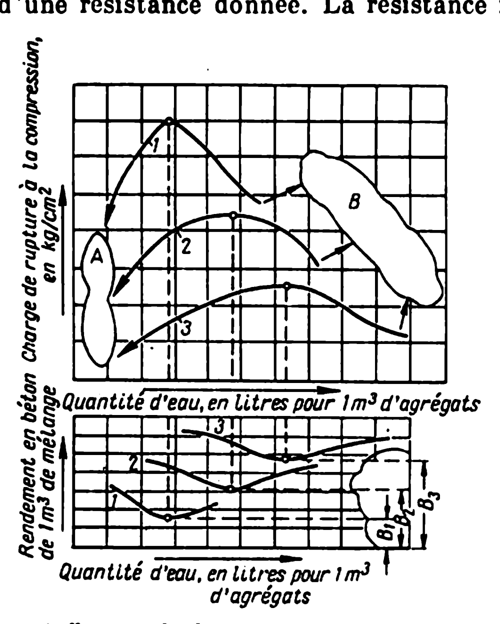


Fig. 66. Influence de la consommation en eau sur la résistance mécanique d'un béton léger, et le rendement en béton pour divers degrés de compaction du mélange : 1 — forte compaction ; 2 — compaction moyenne ; 3 — faible compaction. A — quantité d'eau insuffisante ; B — quantité d'eau excessive ; B_1, B_2 et B_3 — rendements minimaux en béton

des agrégats ne doit pas être inférieure à celle du béton. C'est seulement alors que le ciment peut être consommé avec économie. Si l'on emploie des agrégats faibles, la consommation de ciment devra être augmentée.

D é t e r m i n a t i o n d e l a c o m p o s i t i o n d u b é t o n. On détermine expérimentalement la composition à adopter dans un béton léger, en opérant dans l'ordre suivant.

On détermine la composition granulométrique optimale du mélange à l'aide d'un graphique (fig. 67). Avec des agré-

gats dont la composition granulométrique est optimale, on fait des gâchages de béton avec des liants de trois proportions différentes, par exemple 150, 200 et 250 kg pour 1 m³ de volume des agrégats. Pour chacune de ces compositions, on détermine la consommation en eau optimale. On prépare avec les bétons ainsi obtenus des cubes-éprouvettes compactés par le procédé adopté. Pour chacun des mélanges correspondant à des proportions de liant différentes,

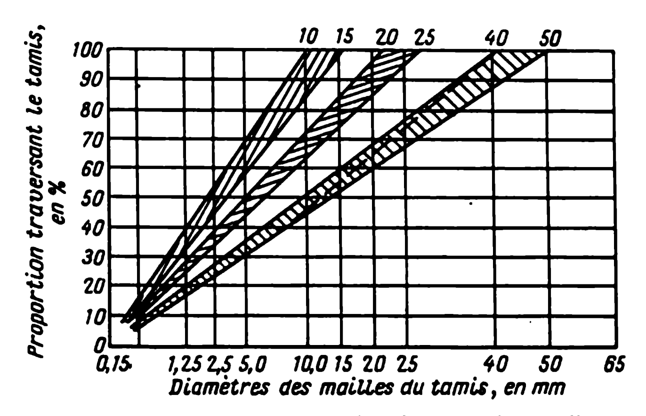


Fig. 67. Composition granulométrique des mélanges d'agrégats légers (les zones hachurées correspondent aux compositions optimales)

on détermine la proportion d'eau optimale au rendement minimal en béton.

La moyenne des résultats des essais sur les éprouvettes permet de tracer les courbes de résistance du béton en fonction du rapport E/C et de déterminer d'après ces courbes, la composition donnant la résistance requise.

On exprime la composition des bétons légers par les rapports volumiques des matières sèches. Dans les bétons à marques inférieures à 25-35, le rapport du volume du liant à la somme des volumes des agrégats est compris généralement entre 1/10 et 1/15. Si les agrégats employés sont des laitiers de combustion, ce rapport est quelque peu inférieur : 1/6-1/8.

Les bétons légers compacts que l'on emploie dans les éléments armés ont des compositions comprises entre 1/6 et 1/7, pour une consommation de liant de 250 à 180 kg/m³ de béton. Dans les bétons compacts, on emploie comme

agrégats fins un sable quartzeux ordinaire. Ce sable accroît la compacité et la résistance du béton, mais il accroît également sa masse volumique, et par suite dégrade les qualités calorifuges du béton.

Pour fabriquer les bétons légers on emploie diverses catégories de liants : chaux aériennes sans additions ou bien avec une addition de 15 à 20% de ciment Portland, ciment Portland, ciment Portland de pouzzolane, ainsi que toutes les autres catégories de liants hydrauliques.

Les bétons à agrégats légers sont préparés de la même façon que les bétons ordinaires, sauf qu'ils demandent un malaxage plus soigné. Dans ce but, on emploie des mélangeurs fonctionnant selon le principe de malaxage forcé. Un béton léger est mis en œuvre et entretenu tout comme un béton lourd ordinaire.

Béton à grosses porosités. Un des genres de bétons légers est le béton à grosses porosités préparé avec un liant, de l'eau et de gros agrégats, c'est-à-dire sans sable. En outre, pour préparer les bétons à grosses porosités, on utilise une quantité limitée de liant pour que la pâte de ciment enrobe les gros agrégats d'une mince couche. La structure poreuse de ces bétons est due à l'absence de sable remplissant les vides entre les gros agrégats et à la faible proportion de liant.

Le béton à grosses porosités est un matériau bon marché, de caractère local. Pour le fabriquer, on emploie en effet des roches locales, tant légères que lourdes (calcaires), et l'on consomme peu de ciment jusqu'à 100-150 kg pour 1 m³ de béton.

On emploie le béton à grosses porosités pour fabriquer les grands blocs et panneaux muraux préfabriqués.

b) Bétons caverneux

On prépare le *béton mousse* en mélangeant une pâte de ciment (un mortier) avec une mousse spéciale à structure stable. Parmi les bétons mousses, on distingue le béton calorifuge dont la masse volumique est inférieure à 600 kg/m³ et le béton de construction (armé) dont la masse volumique est supérieure à 600 kg/m³.

On prépare la pâte des bétons mousses calorifuges en mélangeant du ciment Portland avec du sable quartzeux broyé, en rapports de 1 : 1 à 1 : 3.

La mousse est obtenue en brassant énergiquement un mélange liquide de savon de colophane et de colle animale ou une solution aqueuse de saponine (extrait de la racine de saponaire). Cette mousse conserve longtemps son caractère et se mélange bien avec la pâte de ciment ou le mortier qui enrobent les pellicules entourant les cellules d'air, puis durcissent pour donner au béton une structure cellulaire finement poreuse.

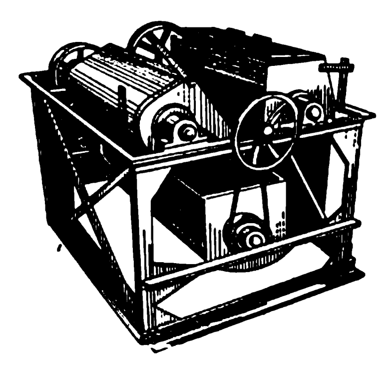


Fig. 68. Malaxeur pour béton mousse

On prépare le béton mousse dans des malaxeurs spéciaux (fig. 68) comprenant 3 tambours dans lesquels tournent des arbres munis de pales. On prépare la pâte liquide de ciment dans l'un des tambours supérieurs, et l'on bat la mousse dans l'autre. Le contenu de ces deux tambours est ensuite déversé dans le tambour inférieur où il subit un brassage intensif pendant 2 à 3 minutes. Le béton mousse ainsi obtenu est ensuite versé dans les moules.

La résistance à la compression d'un béton mousse calorifuge est comprise entre 4 et 15 kg/cm² et son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,08 et 0,25 kcal/m·h·°C. On emploie ce matériau pour l'isolation thermique des couvertures. Le béton mousse de construction a une résistance à la compression qui est comprise entre 35 et 100 kg/cm² et un coefficient de conductivité thermique compris entre 0,16 et 0,40 kcal/m·h·°C. Le béton mousse de construction (armé), grâce à sa haute résistance à la flexion, peut servir à la fabrication de plaques tant portantes que calorifuges.

On prépare le b é t o n a u g a z, à partir d'une pâte de ciment à laquelle on ajoute parfois du sable broyé, des laitiers broyés ou d'autres agrégats analogues. Pour produire le gaz, on ajoute à la pâte de ciment de la chaux en poudre et de la poudre d'aluminium. Ces deux produits réagissent de la façon suivante:

$$3Ca(OH)_2 + 6H_2O + 2Al = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3H_2$$

avec un fort dégagement d'hydrogène. Ce phénomène fait gonfler la pâte de ciment qui durcit en conservant sa structure poreuse.

La composition du béton au gaz est à peu près la suivante : 90% de ciment Portland, 9,75% de chaux en poudre et 0,25% de poudre d'aluminium avec un rapport E/C compris entre 0,55 et 0,65. Pour accélérer la prise du ciment on réchauffe l'eau jusqu'à 30 ou 50 °C. La fin de la prise doit coïncider avec la fin du dégagement d'hydrogène.

Au début du dégagement gazeux, on déverse le béton au gaz dans les moules jusqu'à la moitié de leur hauteur. Le gonflement qui se produit ensuite remplit les moules complètement.

Le béton au gaz doit durcir dans un milieu chaud et humide. On peut accélérer son durcissement en autoclave. Dans cette éventualité, on remplace une partie du ciment par du sable broyé, du laitier broyé ou d'autres additions analogues.

Le béton au gaz possède des propriétés analogues à celles du béton mousse, et on l'emploie pour les mêmes éléments de construction.

Les bétons caverneux acquièrent une importance particulière dans la préfabrication. Ces bétons, matériaux calorifuges de haute qualité, ouvrent la voie à la construction par grands panneaux, car ils permettent de fabriquer des éléments d'une grande surface (15 à 20 m^2) d'un poids relativement faible.

CHAPITRE VII

ÉLÉMENTS EN BÉTON ARMÉ DANS LA PRÉFABRICATION

§ 1. GÉNÉRALITÉS

Les bâtiments et édifices assemblés en éléments de béton armé possèdent les avantages suivants, qui déterminent leur importance primordiale dans la construction moderne :

1. Les éléments en béton armé sont bon marché, parce qu'essentiellement constitués par des agrégats largement répandus (sable et gravier ou pierraille) occupant jusqu'à 90% du volume du béton ;

2. La longévité du béton armé est supérieure à celle des matériaux de construction tels que le métal et le bois. Le béton armé ne brûle pas, ne pourrit pas, ne s'oxyde pas et enfin ne se déforme pas, comme c'est le cas des structures métalliques, en cas d'incendie. Les éléments en béton armé résistent très bien à l'humidité atmosphérique variable et ne nécessitent aucun entretien particulier ;

3. Une méthode de production relativement peu compliquée permet de préfabriquer des éléments aux formes et dimensions les plus diverses, depuis les dalles à parois minces et les voiles de 2 à 3 cm d'épaisseur jusqu'aux blocs massifs de plusieurs mètres d'épaisseur pour les ouvrages hydrotechniques ;

4. Les éléments en béton et béton armé peuvent être obtenus avec des caractéristiques mécaniques et physiques diverses, selon leur désignation. Des procédés de fabrication convenablement choisis et un choix approprié des matériaux permettent d'obtenir un béton (ou béton armé) de qualité voulue : très résistant, mauvais conducteur de la chaleur, imperméable à l'eau. Cela ouvre la voie à de nombreuses possibilités d'emploi du béton et du béton armé dans les divers structures et ouvrages. Par exemple, la résistance mécanique est la caractéristique déterminante dans les élé-

ments porteurs (poutres, fermes, colonnes). La conductivité thermique prend une importance particulière dans les murs extérieurs, et l'imperméabilité à l'eau dans les ouvrages hydrotechniques;

5. Comparativement aux charpentes métalliques, le béton armé permet de réduire de trois à quatre fois la consommation en acier. Cet avantage du béton armé a une énorme importance au point de vue de l'économie nationale.

A côté des avantages que nous venons de signaler, les éléments en béton armé présentent un défaut essentiel,

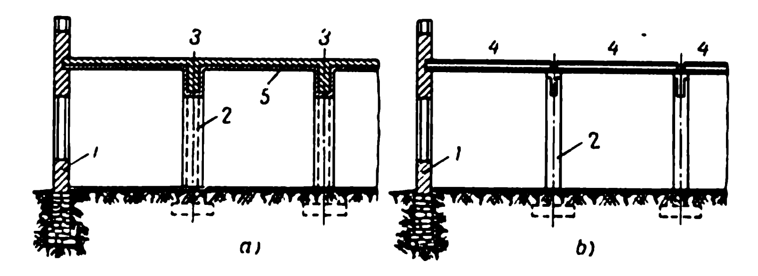


Fig. 69. Schéma de planchers en béton armé :
a — monolithe ; b — préfabriqué ; 1 — mur ; 2 — poteaux ; 3 — poutre; 4 — dalle de plancher; 5 — coffrage de plancher monolithe

qui est leur poids relativement élevé. Cela entraîne des frais supplémentaires de transport et accroît le coût du montage de l'élément. Aussi, l'une des principales tâches des ingénieurs des procédés et des constructeurs est de réduire le poids relatif des éléments. On obtient ce résultat par la précontrainte de l'armature (voir plus loin), l'emploi des bétons légers et en donnant aux divers éléments des formes plus rationnelles.

On distingue deux genres de structure en béton armé : monolithe (fig. 69,*a*) et préfabriquée (fig. 69,*b*). Pour réaliser une structure monolithe, il faut tout d'abord aménager un coffrage (moule provisoire), puis y placer l'armature et ensuite couler le béton. Après durcissement du béton, le coffrage est démonté, mais pas avant 7 à 10 jours après la coulée.

La construction d'un plancher monolithe en béton armé nécessite donc un double travail : aménager le coffrage, y placer l'armature et y couler le béton, puis attendre que le béton ait durci ; ce n'est qu'ensuite que l'on peut charger

le plancher. La réalisation de structure monolithe se complique particulièrement en hiver. Le durcissement normal d'un béton nécessite une température positive. Un béton mis en place en hiver doit donc être réchauffé pendant les premiers jours de son durcissement. Si la température du béton est inférieure à +5 °C, le durcissement ne progresse pratiquement pas ; de plus tout gel prématuré du béton lui fait perdre totalement ou partiellement sa résistance mécanique.

On procède tout autrement pour construire les planchers préfabriqués en béton armé (fig. 69,*b*). On transporte sur le chantier les divers éléments préfabriqués : poteaux, poutres, dalles et tout se ramène à assembler ces éléments. Ce procédé accélère considérablement la construction et la simplifie : plus de coffrage, plus de temps perdu à attendre le durcissement du béton dans le coffrage lorsque la structure est monolithe. Ces deux facteurs suffisent pour donner au béton armé préfabriqué une supériorité technique et économique sur le béton armé monolithe.

A côté des avantages précédents, d'autres facteurs jouent un rôle tout aussi important dans la fabrication et l'emploi des éléments préfabriqués.

Les éléments préfabriqués en béton armé sont réalisés en usine ou sur chantier où les processus opératoires sont rationnellement organisés et fortement mécanisés. Cela permet de réduire le coût de fabrication du béton armé et d'améliorer la qualité et la résistance mécanique des structures.

La fabrication en usine des éléments en béton armé donne également une économie de matière, les procédés de moulage plus perfectionnés permettant de réduire les dimensions de certains éléments. Par exemple, il est très difficile de réaliser sur place un plancher monolithe de 4 à 5 cm d'épaisseur, et il est pratiquement impossible de réaliser des dalles de moins de 4 cm d'épaisseur, même lorsque le calcul indique qu'une épaisseur inférieure serait suffisante. Au contraire, il n'y a guère de difficulté à fabriquer des dalles de 2 à 3 cm d'épaisseur en usine.

La préfabrication permet de réaliser une économie importante de matières due à leur meilleur stockage et à une réduction des pertes. Il est beaucoup plus simple d'organiser correctement le stockage du ciment, des agrégats et de l'armature en usine que sur un chantier.

En outre, la fabrication des éléments en usine ne nécessite pas de coffrage en bois. L'économie en bois est importante, sa consommation pour les coffrages atteignant souvent 1,5 m³ pour 1 m³ de béton armé monolithe.

§ 2. NOTIONS SUR LE TRAVAIL DU BÉTON ARMÉ

Tous les éléments des structures sollicités par des charges de flexion subissent des contraintes de compression dans leur partie supérieure et des contraintes de traction dans leur partie inférieure (fig. 70).

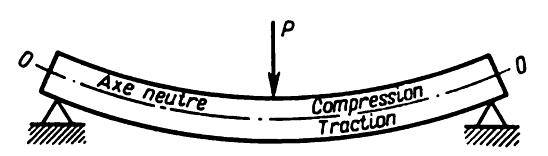


Fig. 70. Schéma de la flexion d'une poutre métallique

On a déjà noté que le béton travaille bien à la compression et mal à la traction. La résistance du béton à la traction étant 10 à 15 fois plus faible que sa résistance à la compression, la zone inférieure tendue d'une poutre se rompt beaucoup plus rapidement (par fissuration) que la zone supérieure qui est comprimée. L'apparition d'une fissure réduit la section utile d'une poutre; il en résulte que les fissures augmentent. Finalement, elles détruisent complètement la poutre de béton, bien que la zone supérieure comprimée puisse supporter une contrainte de compression engendrée à la flexion beaucoup plus forte. Le béton, qui est un matériau fragile, ne doit donc pas être employé pour fabriquer des éléments travaillant à la flexion car sa résistance mécanique sera loin d'être utilisée complètement. Ceci limitait considérablement l'emploi du béton dans la construction.

Pour remédier à ce défaut, on arme le béton avec de l'acier dans les zones de l'élément travaillant à la traction (c'est-à-dire dans la zone inférieure sur la fig. 71). L'acier a une grande résistance à la traction, tandis que le béton résiste très bien à la compression. Le béton armé constitue donc une association extrêmement efficace du béton et de l'acier travaillant ensemble dans un même matériau.

La possibilité de faire travailler ensemble dans le béton armé deux constituants dont les propriétés sont radicalement différentes est déterminée par les facteurs suivants d'une importance capitale :

le béton adhère énergiquement aux barres d'acier, ce qui rend le béton armé parfaitement monolithe ;

les coefficients d'expansion thermique du béton et de l'acier sont à peu près les mêmes;

le béton protège l'acier contre la corrosion.

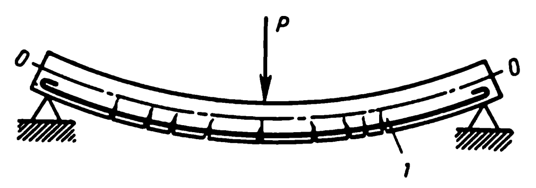


Fig. 71. Schéma de la flexion d'une poutre en béton armé

En fonction du procédé employé pour armer le béton et de l'état de l'armature, on distingue les pièces en béton armé ordinaires et *précontraintes.*

Dans les pièces en béton armé ordinaires le procédé de ferraillage employé est conforme au cas déjà considéré de renforcement d'une poutre en béton avec des barres d'acier. Mais, lorsqu'on emploie le procédé ordinaire de ferraillage, des fissures apparaissent inévitablement dans les zones tendues du béton parce que le béton s'allonge extrêmement peu (moins de 1 à 2 mm par mètre courant), alors que, sous une même charge, l'acier s'allonge 5 à 6 fois plus. La présence de fissures nuit considérablement à la qualité du travail d'une pièce en béton armé : la flèche augmente, l'humidité et les gaz pénètrent dans les fissures, et les barres de l'armature risquent de rouiller.

On peut prévenir la fissuration du béton sous les charges utiles en comprimant au préalable le béton dans les zones travaillant à la traction de la pièce. Les fissures dans un béton comprimé au préalable se produisent plus tard. (En effet, avant que des contraintes apparaissent dans le béton, les tensions de la précontrainte devront être surmontées.)

Le béton est comprimé dans la zone tendue par la précontrainte (par traction) de l'armature en acier de la pièce. On distingue ici deux catégories de pièces précon-

traintes. Dans le premier cas, la précontrainte de l'armature est réalisée avant le durcissement du béton, tandis que dans le deuxième cas, elle est réalisée lorsque le béton a déjà atteint une certaine résistance mécanique.

Quand la contrainte de l'armature est réalisée avant le betonnage (fig. 72,*a*), l'armature *2* placée dans le moule *1* est ancrée à la butée *3*, puis tendue avec un dispositif spécial *4*. Le moule une fois rempli de béton *5* et le béton une fois durci, l'armature est libérée de la contrainte et elle comprime en se raccourcissant le béton qui l'enrobe.

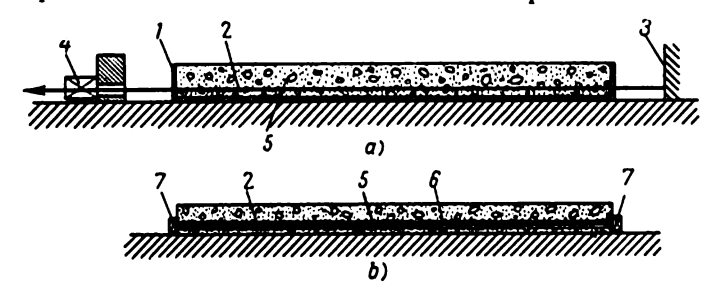


Fig. 72. Schéma d'une pièce précontrainte

Si l'armature est contrainte après durcissement du béton (fig. 72,*b*), les barres d'acier *2* n'adhèrent pas au béton *5* ; elles sont disposées dans le canal *6* spécialement aménagé dans le béton, ou encore, enveloppées de bitume pour éviter toute adhérence avec le béton. Après durcissement du béton, on tend les barres et on les fixe aux extrémités de la pièce par des dispositifs d'ancrage *7*, ce qui a pour effet de comprimer le béton.

La précontrainte, qui est le procédé le plus efficace pour protéger le béton tendu contre les fissurations, permet également de réduire la consommation en barres, et par suite de réduire le poids des pièces en béton armé et d'accroître leur durée.

§ 3. CLASSIFICATION DES PIÈCES EN BÉTON ARMÉ

La classification des pièces préfabriquées en béton et en béton armé repose sur les caractéristiques suivantes de ces pièces : procédé d'armaturage, catégorie du béton employé, structure, poids et usage des pièces.

Procédé d'armaturage. Les éléments structuraux et les pièces peuvent être en béton non armé (blocs de murs des bâtiments, plaques calorifuges) ou bien en *béton armé*, c'est-à-dire être armés de barres d'acier (poutres, fermes, panneaux, etc.).

Comme il a été déjà dit, les éléments structuraux et les pièces en béton armé peuvent être soit précontraints, soit non, c'est-à-dire posséder dans ce dernier cas une armature ordinaire.

Catégories de béton. Les éléments structuraux et les pièces modernes peuvent être exécutés soit en bétons ordinaires (béton lourd) soit en bétons légers. On emploie généralement les bétons ordinaires pour fabriquer les pièces en béton armé sollicitées par des charges importantes.

Ces bétons ne remplissent généralement aucun rôle d'isolation acoustique ou thermique (poutres, colonnes, dalles de plancher). Pour les murs et couvertures des bâtiments, on emploie des pièces en béton léger et en béton caverneux. Il faut citer ici les blocs de murs, certaines catégories de dalles et de panneaux de couvertures

Structure de la pièce. D'après leur structure, on distingue les pièces massives ou creuses, fabriquées avec un béton d'une seule ou plusieurs compositions.

Poids. On distingue les pièces en béton de faible poids qui peuvent être mises en place à la main (par exemple les pierres des murs, les appuis de fenêtres). La plupart des pièces sont toutefois de grandes dimensions et doivent être mises en place à l'aide de machines (par exemple les blocs de murs, les panneaux, les dalles de planchers, les volées d'escaliers).

Usage des pièces et dispositifs. Les pièces préfabriquées en béton armé peuvent être classées d'après leur usage principal en groupes suivants.

Pièces destinées aux immeubles d'habitation et aux édifices publics : blocs et panneaux muraux, fondations préfabriquées, poteaux, poutrelles, poutres, dalles de planchers, panneaux pour cloisons, éléments de toitures, marches d'escalier et paliers, blocs sanitaires et techniques, éléments architecturaux;

pièces destinées aux bâtiments et ouvrages industriels : poteaux, poutres (poutrelles), fermes, arcs, éléments des fondations, dalles et panneaux de planchers, panneaux pour

murs et cloisons, croisées pour fenêtres, volées d'escaliers et paliers ;

pièces destinées aux constructions hydrotechniques: dalles-enveloppes, pieux, tuyaux des réseaux d'assainissement et de distribution d'eau, blocs pour quais;

pièces pour ponts et chaussées : éléments de charpentes pour ponts, dalles de revêtements routiers, éléments de plates-formes pour marchandises et passagers, traverses, pylônes pour lignes électriques de contact;

pièces pour les constructions rurales : éléments préfabriqués pour locaux destinés au bétail, éléments de serres et de silos;

pièces d'usage général : tuyaux en béton armé, pylônes des lignes de transport électriques et de communication, réverbères, éléments pour clôtures et puits.

a) Pièces en béton et béton armé employées dans les constructions civiles

B l o c s d e f o n d a t i o n. On réalise les fondations préfabriquées à l'aide de gros blocs pouvant peser jusqu'à 3 tonnes (fig. 73), fabriqués en béton armé, marque 200. Le bloc de fondation inférieur (fig. 73,*a*) est plus large, parce qu'il transmet au sol le poids total de l'ouvrage ; les blocs des sous-sols (fig. 73,*b*), dont le poids peut atteindre 3 tonnes, sont généralement en béton, marque 100. Les blocs muraux des sous-sols peuvent être soit massifs, soit creux.

B l o c s m u r a u x. Les gros blocs muraux ont un poids très variable, qui peut aller de quelques dizaines de kg jusqu'à 5 tonnes et davantage (fig. 74)

On fabrique généralement ces blocs avec un béton léger et des agrégats légers (laitiers, gravillon, kéramsite, etc.). Indépendamment de la catégorie de béton employée, la masse volumique des blocs ne doit pas dépasser 1600 kg m^3, afin de satisfaire aux conditions thermiques imposées. Suivant le nombre d'étages du bâtiment, la résistance du béton des blocs à la compression varie de 50 à 150 kg/cm^2. La résistance des blocs au gel varie de 10 à 15 cycles. Dans certains cas, les gros blocs sont armés d'une armature de montage qui permet de saisir les blocs pour les poser sur le mur.

Les blocs reçoivent un revêtement décoratif sur leur parement extérieur et une couche d'enduit sur leur face intérieure. Le traitement des surfaces des blocs en usine

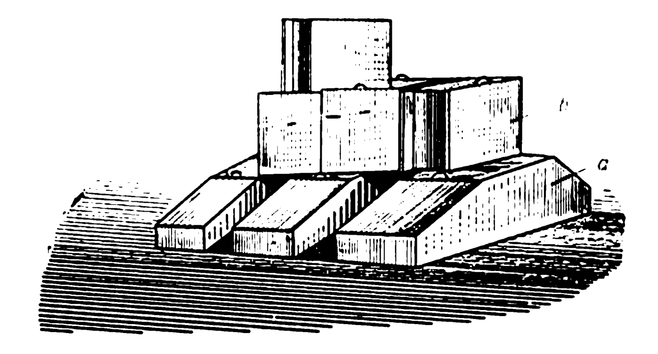


Fig. 73. Blocs de fondations

supprime les travaux du second œuvre sur le chantier, travaux qui demandent beaucoup de main-d'œuvre.

Les blocs sont fabriqués pour murs extérieurs et murs intérieurs.

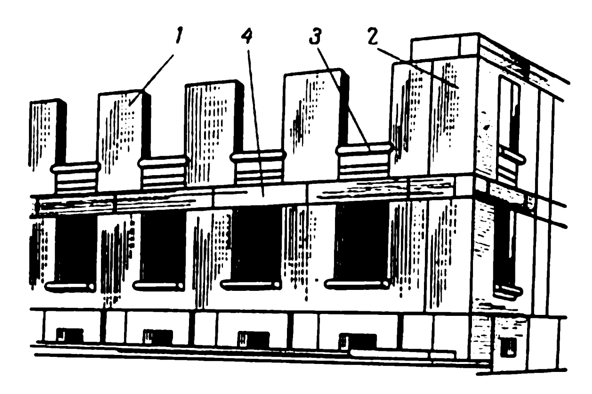


Fig. 74. Blocs muraux :
1 — trumeau ; 2 — trumeau d'angle ; 3 — allège ; 4 — linteau

P a n n e a u x   m u r a u x. Les panneaux des murs extérieurs sont les éléments les plus complexes parmi ceux des bâtiments préfabriqués. La difficulté de leur construction résulte des différents impératifs tels que : résistance méca-

nique, isolations thermique et acoustique, aspect architectural du bâtiment, etc.

Les panneaux porteurs extérieurs des bâtiments sans ossature sont analogues aux gros blocs muraux. On les fabrique en béton armé à agrégats légers (laitier et gravillon kéramsite) et on les recouvre extérieurement d'un mortier décoratif à ciment Portland coloré. Pour fabriquer ces panneaux à deux couches, on pose d'abord l'armature, puis on coule le béton léger dans le moule et ensuite le mortier décoratif.

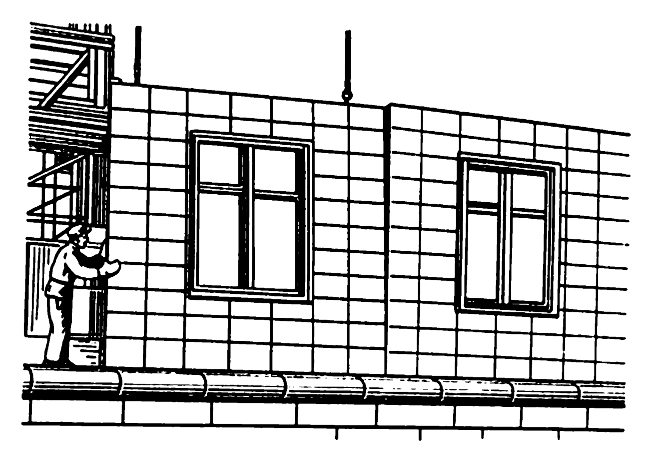


Fig. 75. Panneau de mur porteur

L'épaisseur des panneaux porteurs des murs extérieurs pour les constructions de Moscou est d'environ 30 à 36 cm, et leur surface dépasse généralement 12 m^2. Presque tous ces panneaux de murs comportent en leur milieu une baie remplie en usine par un bloc-fenêtre (fig. 75). Chaque panneau pèse de 3 à 5 tonnes.

Les panneaux autoporteurs des édifices à ossature (fig. 76) sont quelque peu plus compliqués que les précédents. Ils sont constitués par un voile en béton armé rempli d'un béton calorifuge (béton au gaz ou béton mousse).

Les types de panneaux muraux décrits sont loin de constituer tous les types employés dans les constructions industrielles et civiles. Par exemple, les panneaux de la dimension d'une chambre sont assez efficaces. Ils sont constitués

de deux voiles en béton armé entre lesquels est intercalée une couche calorifuge de haute qualité telle que la laine de mâchefer ou les bétons caverneux, etc.

P a n n e a u x p o u r c l o i s o n s. On distingue les grands panneaux de cloisons (entre les chambres) et les panneaux des blocs d'eau.

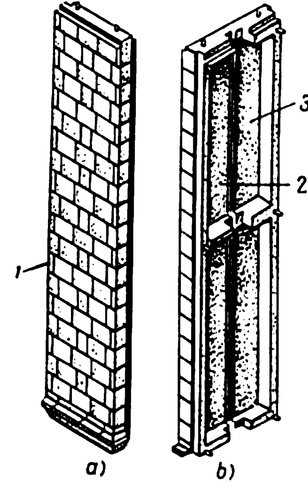


Fig. 76. Panneau autoporteur :
a — parement ; b — face intérieure ; 1 — couche de revêtement (carreaux céramiques) ; 2 — voile de béton armé ; 3 couche calorifuge

Les panneaux pour cloisons entre les chambres sont des plaques plates dont la surface atteint souvent 20 m² et l'épaisseur 8 à 12 cm. On les fabrique avec du béton léger de marques 50 à 75, armé d'un grillage métallique ou de lattes en bois. Certains panneaux pour cloisons comportent des baies avec blocs-portes incorporés en usine.

Les cloisons des blocs d'eau (fig. 77) sont plus petites que les précédentes et ont des baies aménagées pour les portes ainsi que des ouvertures pour le montage des divers réseaux sanitaires et techniques.

Les panneaux pour cloisons doivent satisfaire à des exigences particulières en ce qui concerne l'isolation phonique.

E l é m e n t s d e p l a n c h e r s. P o u t r e s. Dans les édifices publics on utilise surtout des poutres en béton armé de section rectangulaire, mais parfois aussi en T.

Dans la construction d'immeubles préfabriqués à ossature et panneaux les éléments qui supportent la charge des planchers sont des poutres qui jouent également le rôle de contreventement entre les colonnes de l'ossature. Pour assembler les poutres aux colonnes, on prévoit des pièces métalliques incorporées non bétonnées aux extrémités des poutres et sur les colonnes.

Les poutres et poutrelles peuvent atteindre une longueur de 6 m ou même davantage. Les poutres de moins de 6 m de long sont fabriquées en béton armé ordinaire ; celles plus longues sont précontraintes.

D a l l e s d e p l a n c h e r s. La construction d'un plancher en dalles de béton armé sur poutres se fait en deux opérations. On met d'abord en place les poutres, puis on place les dalles sur ces poutres. Pour mieux assembler ces deux éléments et pour simplifier et accélérer le montage, on a créé des dalles et panneaux de grande portée.

On produit actuellement deux genres de dalles de planchers : à alvéoles circulaires et ovales. Ces alvéoles réduisent

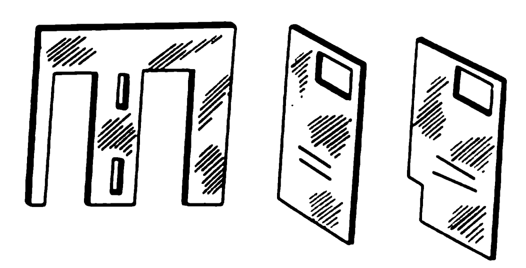


Fig. 77. Panneaux des blocs d'eau

le poids des dalles et permettent de réaliser une grande économie de béton sans réduire la résistance mécanique.

La longueur des dalles correspond à une travée de 6 m. On a adopté une épaisseur constante de 22 cm, la largeur pouvant varier de 79 cm à 1,5 m. Une seule dalle de plancher peut donc couvrir une surface atteignant 9 m².

Une dalle d'un mètre carré pèse de 250 à 300 kg, et sa capacité portante est de 400 à 600 kg/m².

Les dalles de planchers en béton armé à armature ordinaire sont fabriquées avec un béton dont la marque est au moins de 200 ; avec un béton de marque 300 à 400, l'armature est précontrainte.

P a n n e a u x. Les panneaux sont analogues aux dalles. De forme également rectangulaire, ils sont fabriqués à alvéoles ovales (fig. 78,*a*) ou circulaires (fig. 78,*b*).

L'épaisseur des panneaux est à peu près égale à celle des dalles, mais leur largeur est très supérieure et atteint 3,6 m. On fabrique des panneaux ayant la dimension d'une chambre ou de la moitié d'une chambre. Ces deux genres de panneaux diffèrent par leur longueur : les premiers ont une longueur nette de 6,0 m (entre murs) et les deuxièmes une longueur nette de 3,0 m. Les panneaux peuvent peser entre 3 et 5 tonnes.

Outre les panneaux à alvéoles, on emploie également des panneaux nervurés (fig. 78,*c*). Pour donner au plafond une surface plane, les panneaux sont posés, leurs nervures tournées vers le haut, après quoi on les recouvre de plaques plates en béton armé.

Eléments sanitaires et techniques. Dans la construction d'immeubles en éléments préfabriqués, les installations sanitaires et techniques (réseaux d'eau et

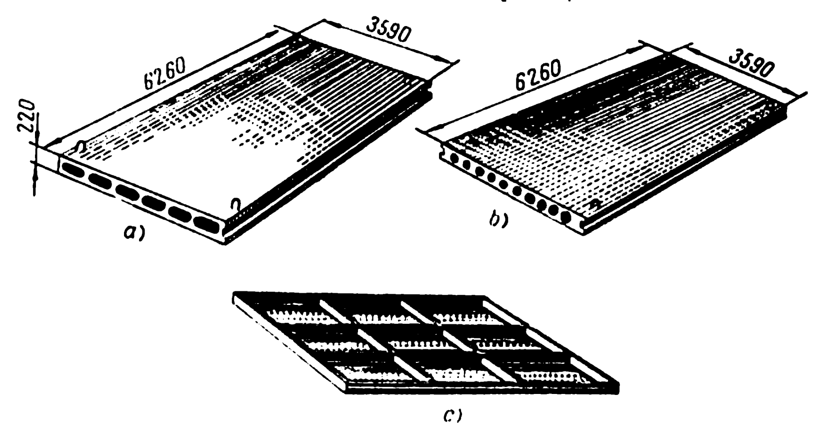


Fig. 78. Panneaux de planchers

d'assainissement, chauffage, évacuation des ordures, conduits de ventilation) sont également réalisées en éléments préfabriqués en béton armé. Toutes les canalisations sont incorporées dans les panneaux ou bien trouvent place dans des blocs spéciaux.

Clôtures en béton armé (fig. 79). Ces clôtures qui ne le cèdent en rien aux clôtures en fonte et en briques en ce qui concerne la durée, coûtent beaucoup moins cher que ces dernières. Pour construire une clôture de ce genre, on recommande d'employer un béton de marque supérieure, 300 ou 400, et de précontraindre l'armature.

Eléments de chambre et de logement. L'évolution des méthodes de préfabrication en béton armé et la création de nouveaux matériaux légers (béton caverneux, béton de kéramsite, etc.) ont permis de monter les immeubles par éléments de chambre et de logement fabriqués en usine (en particulier, éléments-logements du genre représenté sur la figure 80).

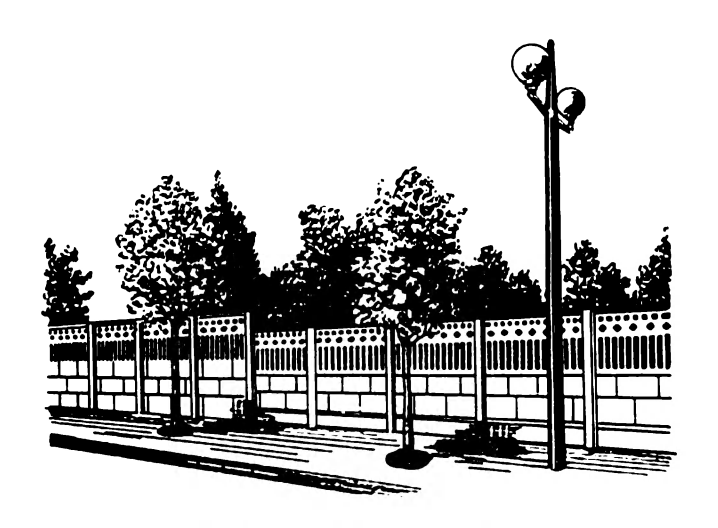


Fig. 79. Clôture préfabriquée en béton armé

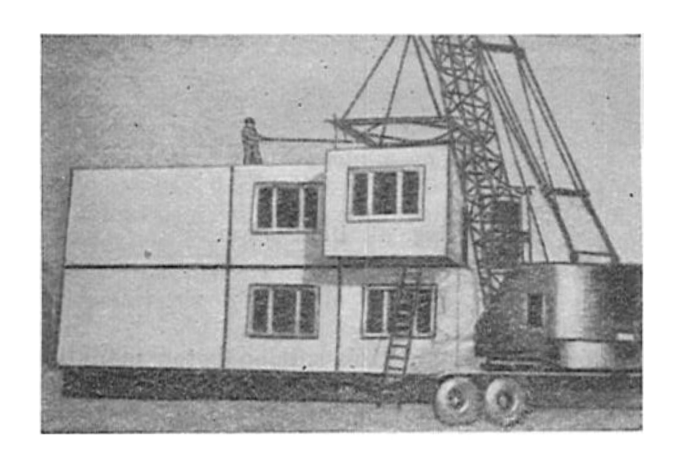


Fig. 80. Eléments de chambre et de logement

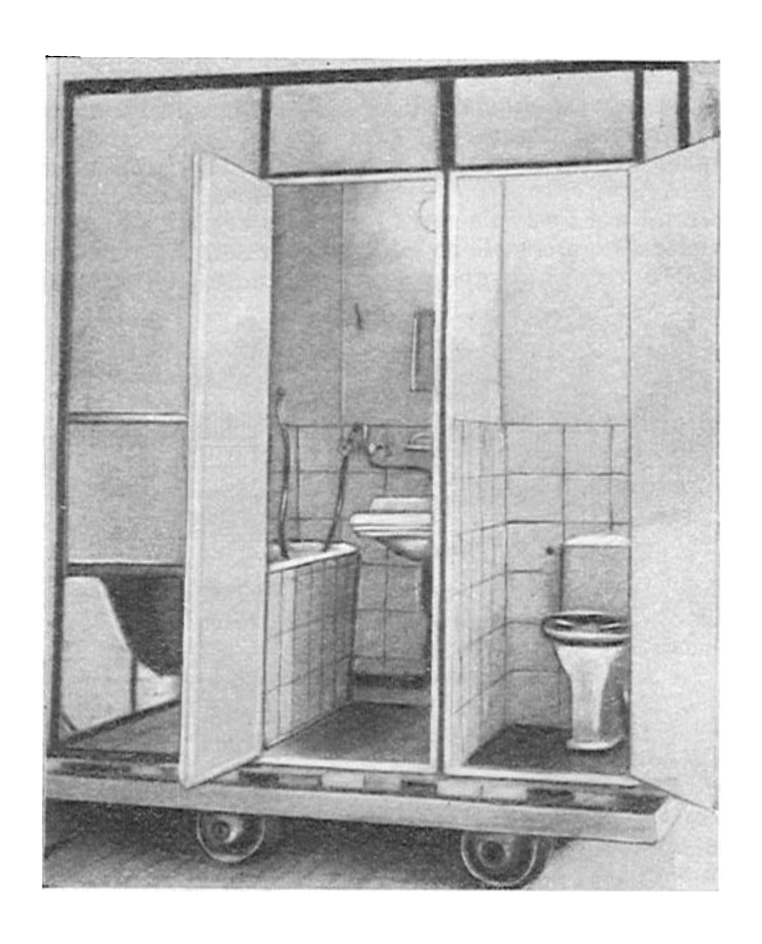


Fig. 81. Blocs d'eau

Ces éléments sont réalisés soit en béton monolithe, soit assemblés en usine à l'aide d'éléments plans soudés.

Outre les éléments-logements et les éléments-chambres, on commence à utiliser largement les blocs d'eau préfabriqués dans les immeubles des grandes villes. Ces blocs d'eau sont également réalisés soit en béton armé monolithe, soit montés en plaques plates d'amiante ciment (fig. 81).

b) Eléments en béton armé des bâtiments industriels

Les fondations préfabriquées des bâtiments industriels sont en principe analogues aux éléments déjà considérés employés dans les fondations préfabriquées des édifices. Mais les autres éléments diffèrent de ceux précédemment examinés parce que les exigences en matière d'isolations phonique et calorifuge des bâtiments industriels ne sont pas aussi sévères.

Dalles de planchers et de couvertures. Ces dalles peuvent être soit plates soit nervurées. Dans les dalles nervurées en béton armé, il est rationnel de faire travailler simultanément l'armature et le béton, afin de réaliser une économie de matière et d'alléger les pièces. C'est pourquoi on a commencé à remplacer les dalles plates par des dalles nervurées. La longueur des dalles peut atteindre 3,0 m, mais leur largeur demeure constante, soit 50 cm. Le poids des dalles nervurées de 3,0 m de long n'excède pas 160 à 180 kg. On emploie un béton lourd de marque 150 pour fabriquer ces dalles.

Outre les dalles examinées en béton lourd, on emploie également des dalles en béton caverneux, soit armées soit non. Les dalles armées peuvent être à la fois des dalles porteuses et servir d'isolation thermique. Elles peuvent donc servir de couvertures sur poutres, tout comme les dalles en béton lourd. Les dalles non armées ne peuvent pas supporter de fortes charges. Aussi, on ne les emploie que pour calorifuger les planchers en béton armé.

Les dimensions des dalles en béton caverneux en plan sont les mêmes que celles des dalles nervurées. On fabrique les premières en 3 épaisseurs : 10, 12 et 14 cm. La masse volumique du béton étant 800 kg/m^3, le poids des dalles normalisées varie de 120 à 170 kg, suivant l'épaisseur.

Les dalles de planchers de grandes dimensions pour bâtiments industriels et les dalles nervurées de grandes dimensions pour couvertures sont les éléments qui satisfont le mieux aux exigences de la préfabrication actuelle (fig. 82,*a*). Les dalles nervurées pour couvertures peuvent également être employées comme planchers. Elles sont très pratiques du fait qu'on peut facilement y aménager des ouvertures

pour le passage des diverses canalisations techniques et sanitaires. Ces dalles, calculées pour une charge utile pouvant atteindre 800 kg/m², peuvent supporter un équipement lourd. On peut également suspendre à ces dalles des trémies.

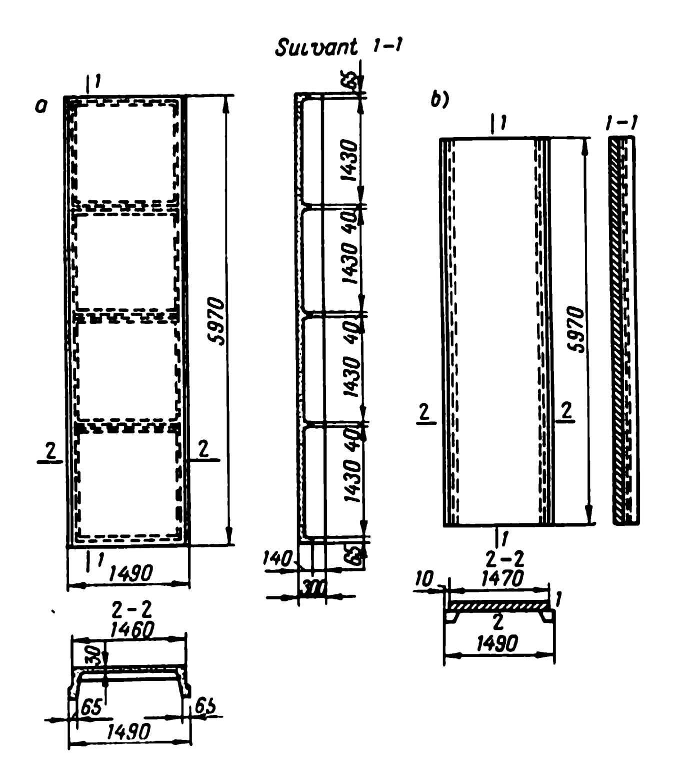


Fig. 82. Dalles de grandes dimensions pour couvertures des bâtiments industriels :
a — en béton armé *b* — en béton mousse armé

Les dalles de planchers et les dalles nervurées préfabriquées peuvent avoir une longueur de 6 à 12 m et une largeur de 1,5 à 3 m.

Pour les couvertures des bâtiments industriels chauffés, on emploie de grandes dalles en béton mousse armé (fig. 82,*b*). Ces dalles sont à la fois porteuses et des isolants thermiques

et peuvent supporter une charge de 600 kg/m². Elles sont constituées d'une tablette *1* en béton mousse armé et de deux nervures longitudinales *2* en béton armé, réalisées avec un mortier ou un béton lourd.

V o i l e s. Dans la construction industrielle on utilise beaucoup les voiles préfabriqués en béton armé comme couvertures. Comparées aux autres systèmes, ces couvertures ont l'avantage de consommer peu de matériaux pour une grande surface de chaque élément. Un voile est une dalle curviligne de 3 à 4 cm d'épaisseur, bordée de nervures au périmètre.

La figure 83 représente un atelier avec couverture en voiles préfabriqués.

P o t e a u x. Les poteaux des constructions industrielles préfabriquées sont à section pleine, rectangulaire ou en T, et à deux montants et à âme en treillis. Ces poteaux peuvent être sans consoles ou bien avoir une ou deux consoles servant à supporter les voies des ponts roulants. Deux types de poteaux sont représentés sur la fig. 84. Les poteaux à montants en treillis ont des indices technique et économique plus avantageux : pour une même capacité de charge, ils sont beaucoup plus légers ; leur hauteur peut atteindre 35 m et leur poids 40 tonnes. Ces poteaux sont précontraints.

P o u t r e s, f e r m e s, a r c s. Les éléments porteurs des planchers et des couvertures des bâtiments industriels sont les poutres, les fermes et les arcs.

On utilise des poutres de types divers dans les bâtiments industriels. Les poutres de 6 à 9 m de long ont généralement une section simple, soit rectangulaire soit en T. Les poutres plus longues, jusqu'à 30 m et davantage, sont des ensembles complexes ayant une section en H. La paroi verticale ou âme d'une telle poutre peut être percée d'ouvertures (fig. 85,*a*) ou bien être pleine (fig. 85,*b*). Le premier système est préférable car il permet d'alléger la poutre et de faire une économie de matière. Les poutres de grande longueur peuvent être simples, c'est-à-dire en une seule pièce, ou bien complexes, c'est-à-dire en plusieurs pièces. On assemble ces dernières sur place en raccordant plusieurs éléments par soudage ou par boulonnage (fig. 86).

Les poutres d'une longueur inférieure à 15 m sont fabriquées en béton armé ordinaire et les poutres de grande longueur en béton armé précontraint.

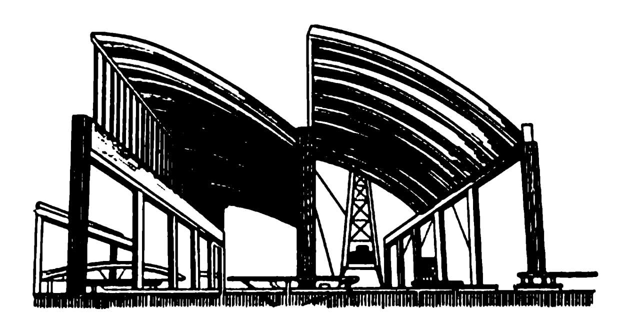


Fig. 83. Atelier avec couverture en voiles de béton armé

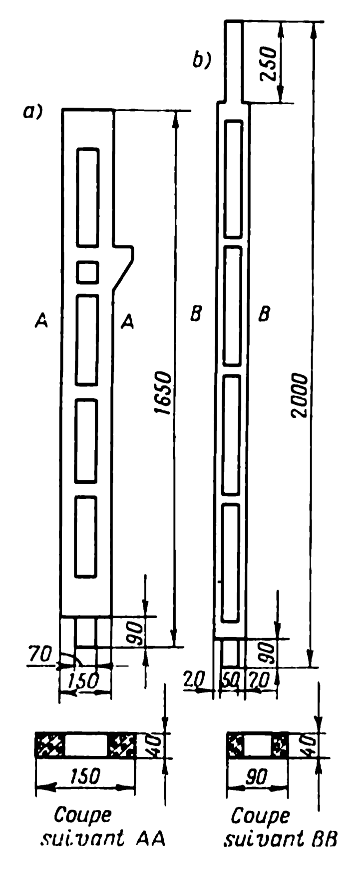
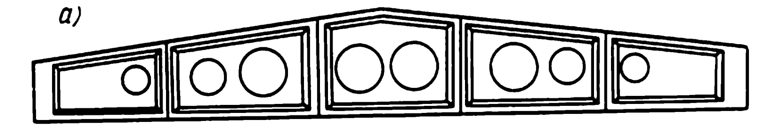


Fig. 84. Poteaux en béton armé :
a — avec console ; *b* — sans console

Les poutres à armature en fils d'acier, dont la charge de rupture peut atteindre 20 000 kg/cm^2, sont une variante des poutres précontraintes.



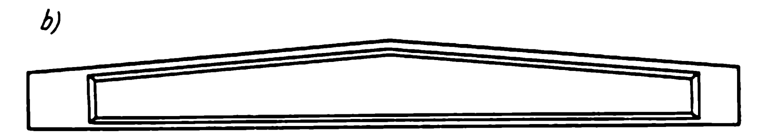


Fig. 85. Poutres en béton armé :
a — à âme ajourée ; *b* — à âme pleine

On a déjà utilisé des poutres atteignant 44 m de longueur et pesant environ 50 tonnes. Ces éléments lourds sont fabriqués sur les chantiers forains à proximité immédiate de leur lieu de montage définitif.

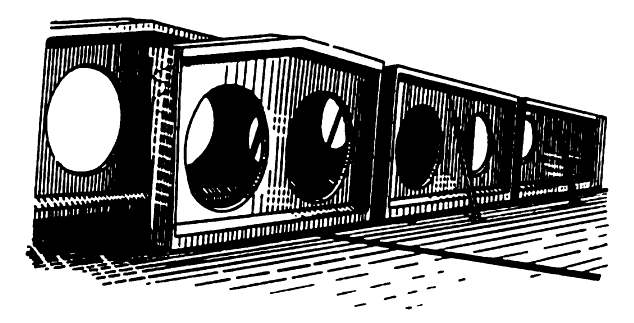
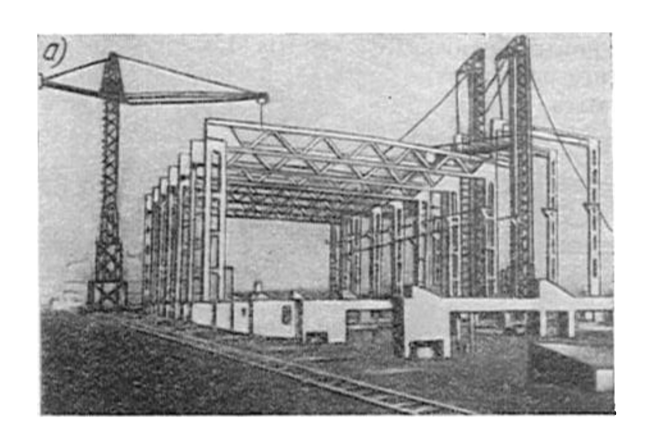


Fig. 86. Eléments préfabriqués d'une poutre complexe assemblable

Si un élément porteur de couverture doit avoir une portée supérieure à 18 m, on emploie également des fermes en béton armé (fig. 87,*a*), ou des demi-arcs s'il s'agit d'une couverture en arc. Les demi-arcs peuvent être à âme pleine ou en treillis (fig. 87,*b*). La portée d'une ferme en béton



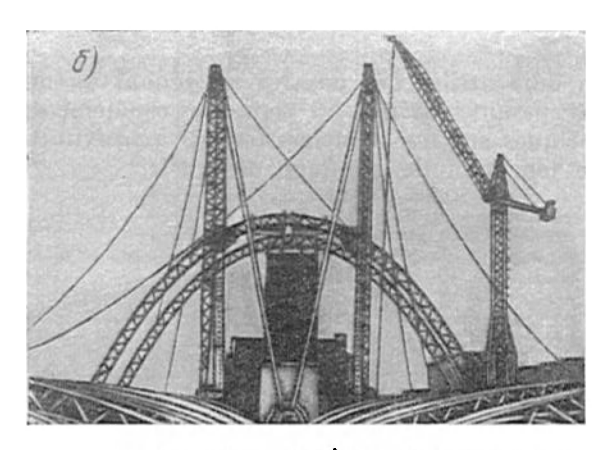


Fig. 87. Couvertures de bâtiments industriels :
a — fermes ; b — arcs

armé peut dépasser 30 m et la longueur d'un demi-arc atteint 50 à 60 m.

Eléments de fenêtres. On commence à employer largement dans les constructions des éléments de fenêtres préfabriqués en béton armé. Ces éléments sont fabriqués soit séparément sous forme de blocs-fenêtres, soit incorporés aux panneaux.

§ 4. PRODUCTION DES PIÈCES PRÉFABRIQUÉES EN BÉTON ARMÉ

La méthode de production des pièces préfabriquées en béton et béton armé comprend quatre opérations principales : préparation du béton, préparation de l'armature (pour les pièces en béton armé), moulage et étuvage.

En fonction du procédé de moulage, on distingue les trois méthodes de fabrication suivantes : 1) moulage en moules fixes; 2) moulage en moules mobiles ; 3) moulage continu.

Quand on utilise des moules fixes, on peut fabriquer les pièces sur bancs, en matrices et en moules verticaux.

Dans l'ensemble des cas, la pièce demeure immobile (dans le moule fixe) durant toutes les opérations de fabrication : mise en place de l'armature et du béton, compaction et durcissement du béton.

Avec les moules mobiles, on fabrique les pièces par deux procédés : à la chaîne avec moule et par convoyeurs.

Dans le procédé à la chaîne avec moule, la pièce se déplace avec son moule suivant le parcours de fabrication, et s'arrête longtemps à un certain nombre de postes de travail, pour y subir les opérations. Dans ce procédé, le béton durcit, non pas là où il a été coulé, comme dans le procédé sur banc, mais dans des chambres à action périodique ou bien dans des autoclaves.

Dans le procédé par convoyeurs, les pièces se déplacent sans arrêt suivant un parcours déterminé et s'arrêtent pendant quelque temps à des postes de travail spécialisés. Dans ce procédé, le béton durcit dans des chambres à action continue.

Le moulage continu des pièces se fait au laminoir (voir fig. 92, p. 247)

Chacun des procédés indiqués a ses avantages et ses inconvénients.

Le procédé sur banc (moulage en moules fixes) convient surtout pour les pièces de grandes dimensions et lourdes. La progression de telles pièces suivant une chaîne de fabrication avec exécution des diverses opérations nécessiterait une consommation élevée de main-d'œuvre et d'énergie. Dans certains cas, il est pratiquement impossible de déplacer les moules (par exemple dans la fabrication des arcs, des fermes de grandes dimensions ou des poutres de grande longueur en une seule pièce).

Si la pièce demeure « sur place » pendant toutes les opérations de fabrication, on évite de nombreuses manutentions qui demandent beaucoup de main-d'œuvre. Le deuxième avantage du procédé sur banc réside dans la simplicité de l'équipement utilisé, dans la possibilité d'organiser très rapidement la production avec des investissements extrêmement réduits. C'est pourquoi ce procédé est largement utilisé tant en usine que sur chantiers forains.

La fabrication en usine diffère de la fabrication sur chantier forain par le fait que toutes les opérations de fabrication sont effectuées à l'intérieur d'un bâtiment dans le premier cas, tandis que seule la préparation du béton a lieu dans un local fermé dans le second cas, alors que les pièces sont moulées sur des bancs à ciel ouvert ou bien dans des chambres à fosses où elles durcissent.

Le défaut du procédé sur bancs est la faible mécanisation des opérations, et par suite une main-d'œuvre importante. Le procédé par convoyeur est beaucoup plus avantageux à ce point de vue, car il permet de mécaniser toutes les opérations essentielles de fabrication. Les inconvénients de ce procédé sont d'une part la nécessité d'investissements extrêmement élevés pour l'équipement et d'autre part, un manque de souplesse lorsqu'il s'agit de passer à la fabrication de nouveaux types de pièces.

Le procédé de fabrication à la chaîne avec moule occupe une position intermédiaire au point de vue technique et économique. Avec des investissements relativement faibles et une mécanisation importante des processus nécessitant beaucoup de travail, il permet de passer facilement à la production de nouveaux types de pièces.

La méthode de fabrication la plus productive est la méthode par laminage. Le défaut de cette méthode est qu'elle ne permet de fabriquer que des pièces de formes limitées (surtout des dalles nervurées) et qu'elle demande beaucoup de ciment par suite de l'emploi de béton à grains fins.

Préparation du béton. On utilise toutes les catégories de bétons : béton lourd, béton léger, béton calorifuge, suivant la destination des pièces préfabriquées en béton et béton armé. Les impératifs que doivent satisfaire ces bétons sont les mêmes que ceux indiqués au chapitre précédent. La seule différence est que, pour alléger les

pièces préfabriquées en béton lourd, celles-ci doivent être réalisées avec un béton de marque non inférieure à 150, les éléments préfabriqués minces (épaisseur ne dépassant pas 40 mm) et non bordés par des nervures de rigidité devant être fabriqués avec un béton de marque non inférieure à 200. Pour fabriquer les pièces précontraintes, il faut employer des bétons de marque non inférieure à 200 ou 300.

P r é p a r a t i o n d e s a r m a t u r e s. L'armature, reçue en rouleaux ou bobines, est tout d'abord redressée. La meilleure façon de redresser les armatures est d'employer des machines automatiques spéciales qui effectuent plusieurs opérations : nettoyage des fils de fer pour les débarrasser des battitures et de la rouille, redressement proprement dit, aplatissement, augmentation de la résistance des barres et sectionnement. Ensuite, on prépare les grilles et carcasses surtout par soudage par points et contact. On fait passer le courant électrique par deux barres qui s'entrecroisent, en appuyant les extrémités des barres l'une contre l'autre. Au point de contact des barres le métal se réchauffe vite à une température supérieure à celle de fusion et les barres se soudent entre elles. Le soudage par contact prend une fraction de seconde si l'on emploie un courant électrique de grande intensité (plusieurs dizaines de milliers d'ampères). On utilise également la soudure par contact pour réunir les barres longitudinalement.

C o u l é e d e s p i è c e s. La coulée, ou moulage des pièces en béton et béton armé, comprend les opérations suivantes : préparation du moule (nettoyage, graissage, assemblage), placement de l'armature dans le moule, coulée du béton et compaction.

Dans le procédé sur bancs, on fabrique les pièces soit dans des matrices qui se trouvent sur le banc, soit dans des moules verticaux. Le banc est une aire plane polie en béton armé avec bords permanents ou démontables que l'on place suivant le périmètre de la pièce à fabriquer. On moule généralement les pièces nervurées en matrices (fig. 88,*a*), et les pièces plates sur les bancs. La figure 88,*b* représente un banc pour la fabrication d'éléments rectilignes précontraints (poutrelles, poutres, etc.).

Dans la matrice ou sur le banc préalablement graissés, on met en place l'armature, après quoi on coule le béton qu'on tasse ensuite avec des vibrateurs agissant en profondeur ou en surface.

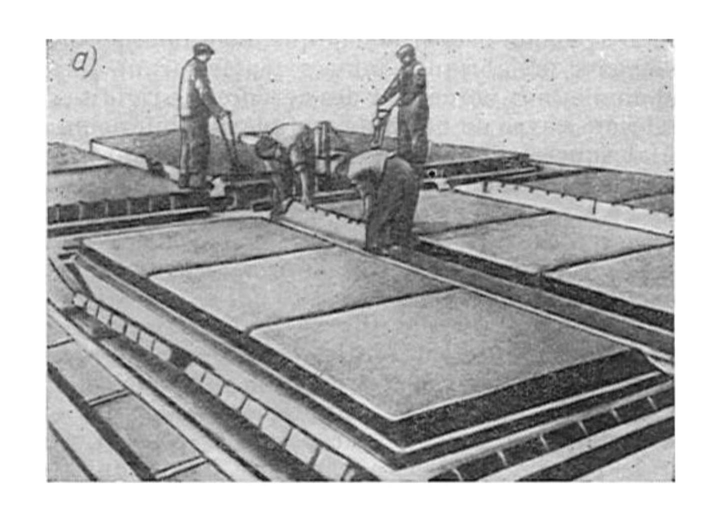




Fig. 88. Fabrication de pièces :
a — en matrices ; *b* — sur bancs

Les pièces sont fabriquées dans les moules verticaux. Cela est un des avantages de ce procédé de fabrication des pièces minces de grande surface (cloisons, marches d'escaliers, panneaux de planchers) car il suffit alors d'une surface de travail relativement faible.

Le moule vertical (fig. 89) comprend plusieurs compartiments (jusqu'à 8 ou 12) délimités par des cloisons métalliques ou en béton armé. Entre chaque compartiment, on

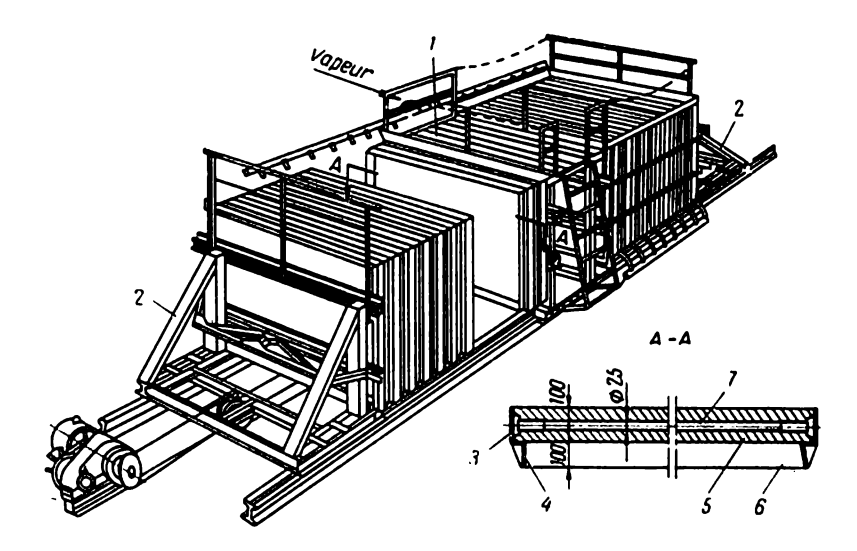


Fig. 89. Moules verticaux pour moulage des pièces en béton armé : 1 — compartiment fixe ; 2 — compartiment mobile; 3 — distributeur de vapeur ; 4 — bord latéral ; 5 — paroi du moule en béton armé ; 6 — enceinte de moulage ; 7 — armature

aménage des enceintes spéciales servant au passage de la vapeur de réchauffage du béton. Les parois des compartiments sont démontables, pour le décoffrage des pièces.

Dans la fabrication à la chaîne avec moules, les pièces sont moulées dans des moules mobiles en métal ou en béton armé. On place le moule avec armature incorporée sur le plateau vibrant ; ensuite, on coule le béton dans le moule, et l'on met en marche le vibrateur du plateau. Sous l'effet des vibrations, le béton se répand, remplit parfaitement le moule et se tasse.

Le plateau vibrant est un cadre métallique sur appuis élastiques du type à ressorts plats ou à boudins. Au centre du cadre du plateau vibrant est calé un excentrique couplé au moteur électrique par l'intermédiaire d'une poulie. En tournant, l'excentrique fait vibrer le cadre du plateau

ainsi que le moule rempli de béton qui se trouve sur le plateau. Afin d'empêcher le moule de glisser du plateau pendant les vibrations, ce dernier est doté d'électro-aimants qui appliquent avec force le moule au cadre.

Un béton d'abord vibré puis soumis au vide devient extrêmement compact car l'aspiration de l'air et de l'eau excédentaire par le vide rend le béton sec et lui communique une résistance mécanique suffisante pour permettre de

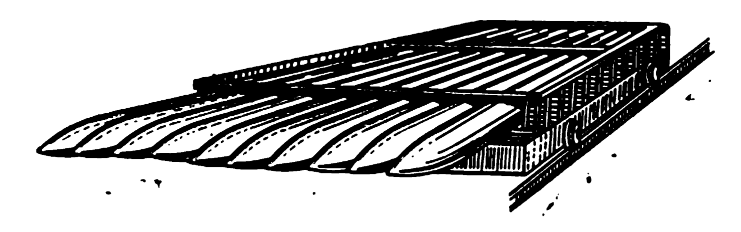


Fig. 90. Moule avec poinçons à alvéoles

décoffrer immédiatement les bords latéraux des moules après moulage de la pièce et de laisser cette dernière sur le fond du moule. C'est là un procédé efficace.

Pour réduire le poids des pièces et consommer moins de matière, les éléments de grandes dimensions sont à alvéoles. On réalise ces alvéoles avec des poinçons spéciaux placés dans le moule avant la coulée du béton et extraits mécaniquement une fois le béton compact.

Par ce procédé, on fabrique des panneaux et dalles de planchers à alvéoles, ainsi que des poutres à alvéoles. La figure 90 représente un moule avec poinçons en place, pour panneaux à alvéoles.

Dans le procédé par convoyeurs, on effectue le moulage dans des chariots de moulage dont les dimensions peuvent atteindre 7,5 × 5,5 m, ce qui permet de fabriquer des pièces jusqu'à 7 m de long et 5 m de large. On place les chariots sur la chaîne du convoyeur et un poussoir spécial les déplace à des intervalles de temps rigoureusement déterminés (environ 15 minutes) le long du convoyeur. On effectue les diverses opérations de fabrication à chaque endroit déterminé du convoyeur.

Pour la fabrication des pièces précontraintes en béton armé l'armature est d'abord précontrainte puis calée pour être libérée, le béton une fois durci.

Pour fabriquer les pièces cylindriques creuses (tuyaux), le béton est rendu compact par centrifugation. L'armature est placée dans un moule métallique circulaire, dans lequel on verse le béton, puis le moule est soumis à une rotation de plus en plus rapide (jusqu'à une vitesse de 1000 tr/mn). Sous l'effet de la force centrifuge, le béton s'écoule en couche uniforme pour adhérer étroitement aux parois des

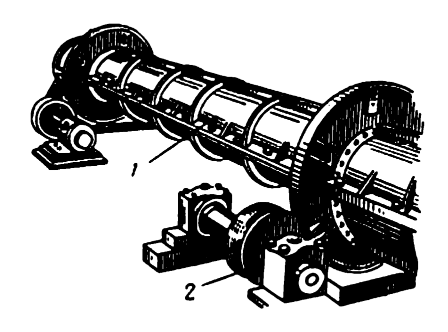


Fig. 91. Machine à fabriquer les tuyaux en béton armé par centrifugation
1 — moule ; 2 — galets de support

moules, se compacte fortement et perd un peu de son eau. La figure 91 représente une machine à fabriquer les tuyaux par centrifugation.

Le moulage continu se fait sur laminoir. Un laminoir (fig. 92) se présente sous l'aspect d'un ruban sans fin en acier, constitué par des plaques dont le profil correspond en creux au profil de la pièce nervurée. Sur le premier secteur du laminoir, on met en place l'armature ; ensuite, on verse sur le ruban le béton rendu compact par vibrations. Le béton ainsi compacté passe par les calandres calibrés qui débitent une pièce d'épaisseur constante à surface lisse.

La pièce moulée passe ensuite dans la section d'étuvage. Un cycle complet de fabrication d'une pièce sur un laminoir dure 2 heures.

Traitement par la chaleur et l'humidité. Dans le procédé sur bancs les pièces sont étuvées à travers les parois de la matrice ou du banc. A cet effet des appareils de chauffage : à vapeur, à eau ou bien électriques sont incorporés dans la matrice ou le banc.

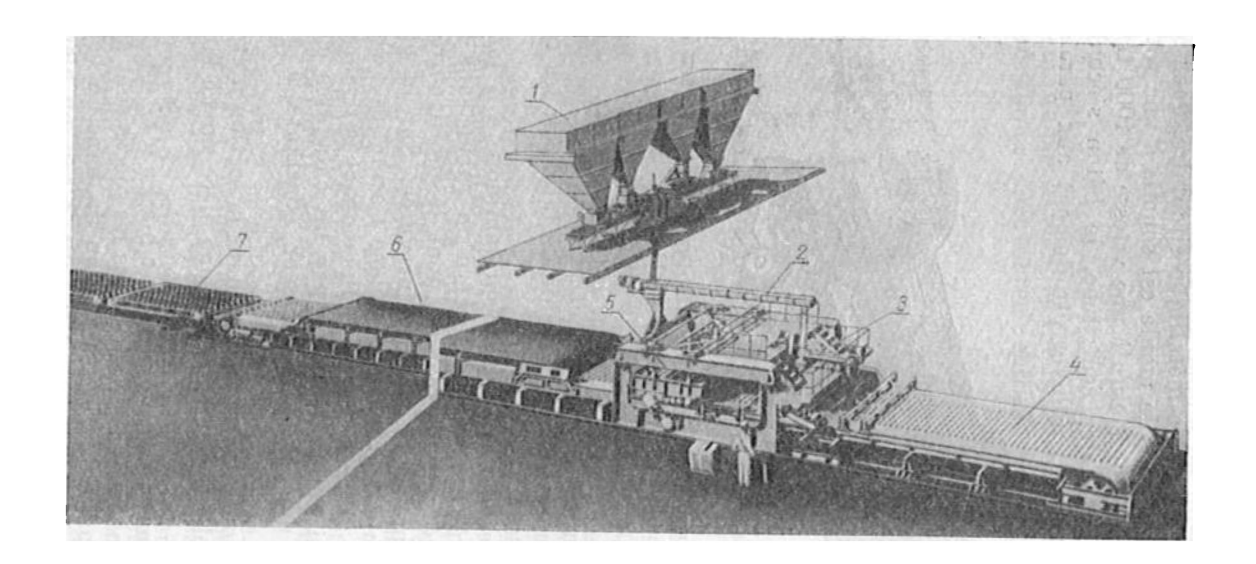


Fig. 92. Vue d'ensemble du laminoir de N. Kozlov pour panneaux de cloisons :

1 — trémies de ciment et sable ; 2 — mélangeur à vis ; 3 — bétonnière continue ; 4 — section de mise en pla-e de l'armature ; 5 — section de mise en place et de compaction du béton ; 6 — section d'étuvage ; 7 — transporteur à rouleaux pour débit des pièces finies

Dans la fabrication à la chaîne, on emploie des chambres d'étuvage à action périodique et des autoclaves. L'étuvage dans les chambres se déroule à une pression normale et une température de 80 à 90 °C et dans les autoclaves, à une pression de 8 à 10 atm et à une température jusqu'à 180 °C.

Sur les convoyeurs, l'étuvage se fait dans des chambres en forme de tunnels à action continue.

L'étuvage termine le cycle de fabrication des pièces en béton armé. Après décoffrage et contrôle technique, les pièces sont stockées pour être ensuite livrées aux usagers.

L'étuvage complique le procédé de fabrication et le rend plus cher. On dispose actuellement de bétons à durcissement rapide qui, sans étuvage, acquièrent en 24 heures 50 à 70% de leur résistance mécanique nominale, ou résistance à 28 jours. On fabrique ces bétons avec des ciments à durcissement rapide : on moule les pièces avec des bétons secs en les compactant énergiquement par vibrations, et en pressant simultanément le béton sous une pression d'environ 100 g/cm^2.

§ 5. TRANSPORT ET STOCKAGE DES PIÈCES PRÉFABRIQUÉES EN BÉTON ARMÉ

Les pièces en béton et béton armé possèdent une grande résistance mécanique mais sont néanmoins extrêmement fragiles. Il faut donc éviter avec soin les chocs brutaux durant les manœuvres de levage et d'empilage. Toute enfreinte à cette règle peut dégrader la qualité des pièces (ébréchures aux angles et aux arêtes, fissurations).

Les pièces en béton et béton armé sont stockées en rangées régulières sur des cales de bois après avoir été triées. Les cales de bois protègent non seulement le parement des pièces contre toute détérioration, mais atténuent les chocs quand on abaisse les pièces.

Les pièces en béton et béton armé doivent toujours être stockées en position qu'ils occuperont définitivement dans l'ouvrage pour supporter leur charge : les panneaux et dalles de planchers horizontalement, les poutres lourdes en H et les fermes lourdes verticalement sur leurs cales, les panneaux de murs verticalement, etc.

En transportant les pièces en béton armé, les placer de façon que leur axe longitudinal soit dirigé dans le sens du mouvement.

Sur les chantiers de construction, il faut placer les pièces en béton et béton armé dans le rayon d'action des grues de montage. Cela évite toute manutention supplémentaire demandant beaucoup de travail sur le chantier même.



Fig. 93. Stockage de pièces préfabriquées en béton armé dans le voisinage de l'ouvrage

Une vue d'ensemble d'une aire de stockage de pièces en béton armé dans le voisinage de la construction est donnée sur la figure 93.

CHAPITRE VIII

MORTIERS

Les mortiers constituent la principale catégorie de matériaux employés pour exécuter les fondations et les murs en agglomérés. Le mortier lie les agglomérés pour former une structure robuste, monolithe et durable. Les mortiers sont également l'une des catégories de matériaux de revêtement qu'on emploie sur les surfaces extérieures et intérieures des murs (enduits). Enfin, les mortiers sont très employés pour fabriquer les pierres artificielles à base de liants (voir chap. IX). L'importance économique et pratique des mortiers est caractérisée par l'exemple suivant. Pour 1 m^3 de mur en deux épaisseurs de briques, avec enduit extérieur et intérieur, il faut en moyenne 200 briques, soit un volume de 0,4 m^3, et 0,2 m^3 de mortier. Ces chiffres montrent que, dans un mur en briques avec enduit sur les deux faces, les briques n'occupent que les 2/3 du volume, le mortier occupant le reste.

§ 1. DÉFINITION ET CLASSIFICATION DES MORTIERS

Un mortier est un matériau pierreux artificiel obtenu après durcissement d'un mélange en proportions convenables de liant, d'eau et d'un agrégat fin (sable). Le mortier diffère donc du béton par le fait qu'il ne contient pas de gros agrégats (pierraille ou gravier) qui sont l'un des composants des bétons. C'est pour cette raison que les mortiers sont parfois appelés des bétons *à grains fins*. Leurs propriétés sont soumises aux mêmes lois que celles des bétons.

On différencie les divers mortiers d'après divers indices dont les plus importants sont la résistance mécanique, la masse volumique, la destination et la catégorie du liant entrant dans la préparation du mortier.

Selon leur *destination* on distingue les m o r t i e r s d e m a ç o n n e r i e et les m o r t i e r s p o u r e n d u i t s. Les mortiers pour maçonnerie doivent avant tout être très résistants, la résistance de la maçonnerie dépendant de celle du mortier.

Les enduits ne sont pas soumis à des actions mécaniques importantes dans la structure. Par contre, leur aspect extérieur et leurs qualités protectrices ont une importance essentielle. Aussi, l'indice de qualité essentiel d'un mortier de revêtement n'est pas la résistance mécanique du mortier mais sa capacité de produire un enduit compact adhérant énergiquement à son support et ayant d'excellentes qualités décoratives.

On emploie les mortiers comme béton à grains fins dans la production des pièces préfabriquées en béton armé. C'est ainsi que l'on emploie les mortiers de ciment Portland pour fabriquer les pièces par le procédé de vibro-laminage et les mortiers de chaux et de sable pour fabriquer les pièces en silicate et en silicalcite (voir chap. IX).

Selon leur *masse volumique* à l'état sec, on distingue les mortiers l o u r d s dont la masse volumique est au moins égale à 1 500 kg/m³, et les mortiers l é g e r s dont la masse volumique est inférieure à 1 500 kg/m³.

Le sable de roche compacte (sable quartzeux) est le principal composant des mortiers lourds. Pour préparer les mortiers légers, on emploie des sables obtenus par broyage des roches poreuses légères (tuf, pierre ponce), ou encore des sables légers artificiels obtenus par broyage des laitiers granulés des hauts fourneaux ou de combustion. Les mortiers légers conviennent beaucoup mieux pour le maçonnage des murs extérieurs que les mortiers lourds. Les premiers conduisent moins bien la chaleur et permettent ainsi de réduire l'épaisseur du mur en briques.

Selon le *liant* employé, on distingue les mortiers a é r i e n s et les mortiers h y d r a u l i q u e s. Les mortiers aériens sont destinés aux éléments structuraux qui se trouvent en conditions sèches, alors que les mortiers hydrauliques sont destinés aux éléments se trouvant en conditions humides. Ces deux mortiers diffèrent par le liant employé : on prépare les mortiers aériens avec des liants aériens, et les mortiers hydrauliques avec des liants hydrauliques.

Les mortiers hydrofuges constituent une variété particulière des mortiers hydrauliques. On les prépare en majorant la proportion de ciment et en utilisant des additions hydrophobes. Les mortiers hydrofuges sont employés comme enduits.

§ 2. PROPRIÉTÉS DES MORTIERS

La propriété la plus importante des mortiers (mélange durci) est la résistance mécanique et celles des mélanges avant durcissement—la fluidité ainsi que le pouvoir de rétention de l'eau ou hydrophilie.

a) Résistance mécanique

De même que pour les bétons, la résistance mécanique d'un mortier après durcissement dépend de deux facteurs principaux : l'activité du ciment et le rapport eau/ciment (E/C). Cette dépendance s'exprime par la formule empirique suivante :

$$R_m = 0{,}25 R_c \left(\frac{C}{E} - 0{,}4\right), \qquad (38)$$

R_m étant la résistance limite à la compression du mortier à l'âge de 28 jours, en kg/cm^2 ;
R_c l'activité du ciment, en kg/cm^2 ;
$\frac{C}{E}$ le rapport de la quantité de ciment à la quantité d'eau.

La résistance d'un mortier est exprimée par sa marque. On choisit la marque d'un mortier d'après la résistance limite à la compression mesurée sur un cube de 7,07 cm de côté. On prépare les éprouvettes cubiques avec le mélange de travail, en les plaçant sur une base poreuse (avec aspiration de l'humidité). On les essaie à l'âge de 28 jours. On a déterminé 8 marques de mortiers de 4 à 200.

On choisit la résistance d'un mortier de maçonnerie d'après les conditions de service de la maçonnerie considérée et la catégorie de l'ouvrage. Les mortiers destinés aux structures exposées à l'humidité (soubassements, parapets, fondations) doivent être plus résistants que les mortiers pour les maçonneries qui se trouvent en conditions sèches. On emploie le plus souvent des mortiers de marques com-

prises entre 4 et 50 pour les maçonneries. Il faut signaler que la résistance d'un mortier a une influence relativement faible sur celle d'une maçonnerie constituée par des pierres de forme régulière. Par exemple, lorsque la résistance du mortier varie de 30 à 35%, celle de la maçonnerie en briques ne varie que de 5 à 7%. Par contre, la résistance du mortier a une plus grande influence sur une maçonnerie en pierre meulière de formes irrégulières.

On emploie des mortiers de marques supérieures à 50 pour l'exécution d'éléments fortement chargés (piliers et poteaux).

On recommande de fabriquer les mortiers de marque 4 avec de la chaux (avec ou sans additions) et avec d'autres liants locaux (ciments de laitier à la chaux, de cendres à la chaux, etc.), en tenant compte des conditions de service de la maçonnerie dans le choix du liant (service en conditions sèches ou humides). Pour préparer les mortiers des marques 10 à 25, on recommande d'employer des liants locaux (chaux hydraulique, ciment de laitier à la chaux ou ciment de laitier sulfaté) ou du ciment Portland avec une forte addition de chaux, de substances minérales actives ou d'agrégats (argile ou calcaire finement broyé). On prépare les mortiers de marques plus élevées avec du ciment Portland auquel on ajoute parfois une faible quantité de plastifiants minéraux (chaux, argile) et des additions minérales actives.

Pour obtenir un mortier de ciment de résistance prescrite, on évalue la proportion de ciment pour 1 m^3 de sable dans les mortiers composés en fonction de l'humidité des murs des locaux et de la catégorie du bâtiment. La proportion de ciment pour 1 m^3 de sable ne doit pas être inférieure à 75 kg dans les mortiers de ciment et de chaux destinés aux locaux secs des bâtiments de première et deuxième catégorie et aux locaux humides des bâtiments de troisième catégorie, ni inférieure à 100 kg dans les mortiers de ciment alumineux et de ciment de cendres. Pour les locaux humides des bâtiments de première et deuxième catégories, la proportion minimale de ciment doit être majorée de 25 kg.

La quantité maximale des additions minérales finement broyées dans les mortiers composés ne doit pas dépasser les limites indiquées au tableau 12. Elle dépend des conditions de service de la maçonnerie et de la nature de l'addition.

Tableau 12

Proportion maximale d'additions dans les mortiers composés

Conditions de service de la maçonnerie	Rapport pondéral maximal du nombre d'additions au poids de ciment				
	Catégorie du bâtiment	Additions pour agrégats (argile, calcaire)	Additions minérales actives	Laitiers granulés	Chaux
Maçonneries travaillant en conditions sèches	1 et 2	0,75/1	0,8/1	4/1	3/1
	3	1/1	1/1	limité par la condition d'obtenir un mortier de marque donnée	
Maçonneries travaillant en conditions humides	1 et 2	0,5/1	1,5/1	6/1	0,6/1
	3	0,75/1	2/1	limité par la condition d'obtenir un mortier de marque donnée	0,75/1

Les compositions pondérales des liants des mortiers de chaux avec additions doivent être :

maçonnerie travaillant en conditions sèches : chaux 65 à 80%, additions 35 à 20%;

maçonnerie travaillant en conditions humides : chaux 40 à 25%, additions 60 à 75%.

Les mortiers de chaux avec additions alumineuses ne doivent être employés qu'en conditions sèches.

b) Fluidité d'une pâte de mortier

La fluidité d'une pâte de mortier est le pouvoir que possède cette pâte de se répandre sous son propre poids ou sous l'effet de forces extérieures.

On exprime la fluidité d'une pâte de mortier par la profondeur d'enfoncement d'un cône étalon pesant 300 g et ayant un angle au sommet de 30° (fig. 94).

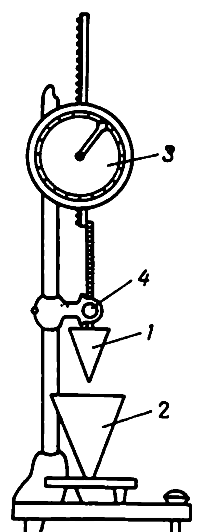


Fig. 94. Appareil pour évaluer la fluidité d'un mortier frais :

1 — cône sur tige mobile ; *2* — récipient contenant le mortier ; *3* — cadran gradué ; *4* — bouton à ressort permettant de libérer la tige

Un mortier est d'autant plus fluide que la proportion de pâte de ciment et le facteur eau/liant* sont plus élevés dans le mortier. Cependant, lorsqu'on veut obtenir un mortier d'une résistance déterminée, la consommation de liant est en principe insignifiante, en particulier quand on emploie un ciment Portland de marque supérieure. Accroître la consommation en ciment pour accroître la fluidité serait augmenter le prix de revient du mortier, ce qui n'est pas à conseiller. Dans de tels cas, on emploie comme addition diverses matières plastifiantes qui accroissent la fluidité du mortier sans augmenter la consommation de ciment.

Ces additions peuvent être des substances minérales finement dispersées (argile, calcaire finement broyé). Une pâte de chaux ajoutée aux mortiers de ciment Portland possède des propriétés plastifiantes élevées. Certaines substances minérales actives (terre d'infusoires, trass) permettent également d'accroître la quantité de pâte de ciment dans le mortier, ce qui augmente la fluidité de ce dernier. Il ne faut pas oublier ici que les plastifiants minéraux n'ont aucune propriété de liant, et qu'au contraire ils diluent le ciment et réduisent sa résistance mécanique. Pour ne pas trop réduire la résistance d'un mortier, il faut procéder expérimentalement afin de déterminer la quantité

---

* Le facteur eau/liant est le rapport du poids de l'eau au poids du liant, le ciment avec addition étant pris pour poids du liant.

d'addition à employer. La proportion d'addition minérale dépend de la nature de cette substance, de l'activité du ciment et des conditions (sèches ou humides) dans lesquelles se trouvera le mortier au cours du durcissement. Dans un ciment à forte activité, on peut ajouter une assez forte proportion d'addition sans craindre de réduire la résistance prescrite du mortier.

Outre les substances minérales finement broyées, on trouve également des propriétés plastifiantes élevées dans certaines substances organiques tensio-actives que l'on ajoute aux mortiers dans une proportion de 0,1 à 0,25% en poids de ciment. On peut citer parmi ces substances la bouillie de sulfite et d'alcool, le milonaphte, le vinsol, etc. Les additions organiques réduisent la consommation en eau du mortier sans diminuer sa fluidité, ce qui permet de réduire également la consommation en ciment.

c) Hydrophilie

L'hydrophilie, c'est-à-dire le pouvoir de retenir l'eau, est une propriété qui a une grande importance pour les mortiers. Cette importance s'explique par le fait que l'on applique généralement les mortiers sur une base poreuse, qui aspire l'eau avidement (brique, béton, bois). Cette aspiration peut réduire fortement la quantité d'eau contenue dans le mortier ; cette quantité d'eau peut devenir insuffisante pour la réaction avec le ciment, si bien que la prise s'arrête. Par ailleurs, l'aspiration d'une partie de l'eau contenue dans le mortier rend celui-ci un peu plus compact, et par suite un peu plus résistant.

Il est important de connaître l'hydrophilie d'un mortier, pour le transporter en de bonnes conditions. Les mortiers faiblement hydrophiles se stratifient en cours de transport, en particulier lorsque le mortier est transvasé par pompage.

L'hydrophilie dépend des proportions relatives des parties composantes du mortier. Si l'on choisit correctement le rapport liant-sable, c'est-à-dire si le liant remplit tous les espaces vides dans le sable et enrobe les grains de sable d'une couche uniforme et mince, le mortier aura une forte hydrophilie et une excellente fluidité.

On peut accroître l'hydrophilie d'un mortier en lui ajoutant certaines substances minérales finement dispersées (chaux, argile, additions minérales actives), toutes les

additions concourant à l'accroissement de la fluidité. Une addition de chaux accroît surtout l'hydrophilie et la fluidité d'un mortier.

§ 3. MORTIERS POUR MAÇONNERIES ET ENDUITS

On exprime la composition d'un mortier par les quantités relatives de ciment, d'addition et de sable. Par exemple, un mortier de composition 1 : 0,8 : 6,5 indique que, pour une partie pondérale de ciment, on emploie 0,8 partie de chaux ou d'argile et 6,5 parties de sable. Mais certains mortiers ne contiennent pas d'addition. La composition du mortier est alors exprimée par le rapport de la quantité de liant à la quantité de sable (exemple, 1 : 5).

Les mortiers pour maçonneries doivent posséder une résistance, une fluidité et une hydrophilie de valeurs données.

On choisit la marque, ou résistance, d'un mortier en fonction des conditions de service de la maçonnerie et de la catégorie du bâtiment. Le tableau 13 indique les marques minimales des mortiers à employer dans les maçonneries.

On choisit la fluidité d'un mortier d'après le genre de maçonnerie adopté (briques ou moellons) et le procédé de mise en œuvre. On estime que la fluidité d'un mortier pour maçonneries est normale lorsque le cône d'essai s'y enfonce de 40-100 mm. Si le mortier est destiné à une maçonnerie de moellons traitée par vibrations, on réduit la fluidité du mortier jusqu'à 10-30 mm, les vibrations concourant à bien compacter un mortier plus sec et à bien combler les joints de la maçonnerie.

Mortiers pour enduits. Un enduit peut avoir uniquement un rôle protecteur, mais il peut également avoir un but décoratif et en même temps protéger les structures du bâtiment contre l'action agressive du milieu extérieur.

Généralement, les couches d'enduit ne supportent aucune charge. Aussi, la résistance mécanique n'a qu'une importance secondaire pour un mortier de revêtement. Mais si l'enduit doit protéger les structures, le mortier devra être très compact, imperméable à l'eau et bien résister à l'action des eaux. Les mortiers pour enduits doivent également

Tableau 13

Marques minimales des mortiers pour maçonneries

Conditions de service de la maçonnerie	Catégorie du bâtiment		
	I	II	III
Murs extérieurs, humidité ne dépassant pas la normale, et fondations en terrains secs . . .	10	10	4
Murs extérieurs de locaux humides, corniches, soubassements et fondations en terrains humides	25	25	10
Murs extérieurs de locaux mouillés, structures exposées à l'air libre et à l'humidité; fondations en terrains saturés d'eau	50	25	10

adhérer énergiquement au support et ne pas se fissurer au retrait.

On emploie diverses catégories de liants pour préparer les mortiers pour enduits. Si l'enduit est destiné aux parties d'un ouvrage systématiquement exposées à l'humidité, ou bien des locaux très humides, le mortier devra être préparé avec des liants hydrauliques. Les mortiers pour enduits doivent également résister au gel si, en cours de service, ils sont exposés non seulement à l'humidité mais encore au gel.

Pour les parties extérieures et intérieures d'un bâtiment qui se trouvent en des conditions d'humidité de l'air normales, on peut employer des mortiers à liants de chaux ou de laitier de chaux. Pour les enduits intérieurs, on emploie des mortiers de chaux et plâtre, l'addition de plâtre accélérant le durcissement de l'enduit au chaux.

On choisit la fluidité des mortiers pour enduits suivant le procédé de leur application adopté (à la main ou à la machine) et de la nature de la couche (sous-couche ou couche de finition).

Le tableau 14 indique les fluidités recommandées des mortiers pour enduits destinés aux diverses couches d'enduits.

Tableau 14

Fluidité des mortiers pour enduits

Désignation des couches d'enduit	Profondeur d'enfoncement du cône	
	Mortiers appliqués à la machine	Mortiers appliqués à la main
Première sous-couche (appliquée par projection)	80-110	110-130
Deuxième sous-couche . . .	60-80	70-80
Couches de finition:		
en mortiers contenant du plâtre	90-120	90-120
en mortiers sans plâtre	70-80	70-80

Pour accroître la fluidité du mortier pour enduits et accélérer son séchage, on emploie des additions tensioactives. Les agrégats des mortiers pour enduits doivent avoir une certaine grosseur limite qui dépend également de la couche d'enduit. La sous-couche peut contenir des grains de sable de 2,5 mm au maximum alors que pour la couche de finition, la grosseur des grains ne doit pas dépasser 1 mm, sinon l'enduit sera rugueux.

Enduits décoratifs. Outre les enduits ordinaires, destinés à être recouverts de peinture ou bien tapissés de papier peint, on emploie également des enduits décoratifs colorés. On prépare les mortiers de ces enduits décoratifs avec des ciments blancs ou colorés et des agrégats colorés constitués par des roches compactes (marbre, granite, etc.).

Pour les enduits et les maçonneries exécutés en hiver, on emploie souvent des mortiers spéciaux, dits mortiers froids, qui ne gèlent pas par temps froid. Dans ce but, on ajoute à la pâte de mortier des substances qui abaissent la température de congélation et accélèrent le durcissement du mortier (chlorure de calcium, sel gemme, etc., à raison de 3 à 5% en poids de l'eau de gâchage). Mais il ne faut pas perdre de vue que ces additions peuvent décolorer l'enduit ou la maçonnerie. L'addition de milonaphte dans ces mortiers réduit les décolorations.

On obtient de bons résultats dans les travaux entrepris en hiver, en ajoutant de la chaux vive broyée au mortier. En réagissant avec l'eau, la chaux vive dégage une grande quantité de chaleur et réchauffe le mortier, ce qui l'empêche de geler prématurément.

§ 4. PRÉPARATION ET TRANSPORT DES MORTIERS

On prépare la pâte de mortier dans un malaxeur constitué par une cuve métallique dans laquelle tourne un arbre muni de palettes servant à brasser les composants du mortier. Les mélangeurs pour mortiers ont des

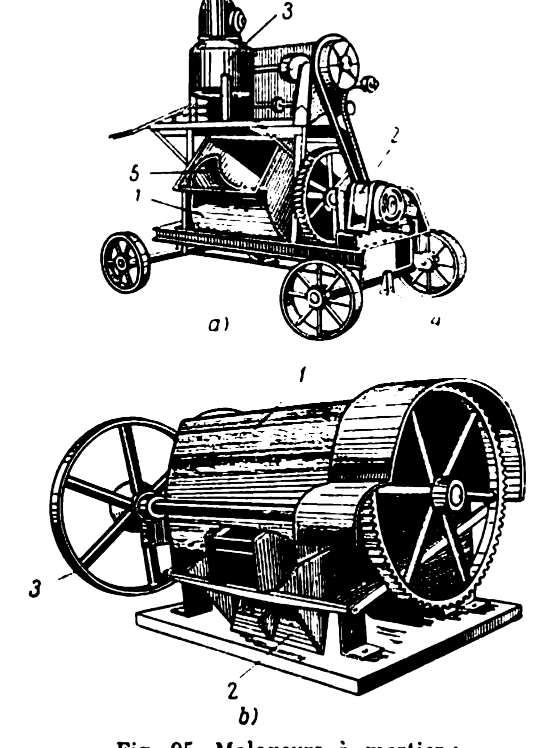


Fig. 95. Malaxeurs à mortier :
a — mobile d'une capacité de 150 litres : 1 — tambour ; 2 — moteur électrique ; 3 — réservoir pour dosage de l'eau ; 4 — train ; 5 — palette de brassage;
b — fixe d'une capacité de 750 litres : 1 — tambour ; 2 — auge de déversement ; 3 — poulie d'entraînement

capacités variant de 50 à 1 500 litres. Les plus répandus ont une capacité de 150 à 750 litres.

Les malaxeurs pour mortiers peuvent être fixes ou mobiles (fig. 95).

On peut préparer les mortiers soit dans des centrales à mortier, soit sur le chantier. Quand le mortier est fabriqué en centrale, on le transporte sur le chantier dans des

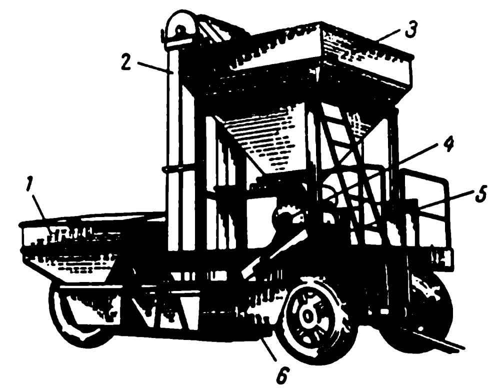


Fig. 96. Malaxeur à mortier mobile à fonctionnement continu

bennes. La centrale peut fournir un mélange de mortier sec que l'on gâche avec de l'eau sur le chantier.

Les mortiers préparés en centrale ont une qualité plus élevée et coûtent moins cher. Il est toujours plus facile d'organiser et de mécaniser en centrale les procédés de fabrication et d'utiliser plus à fond l'équipement et les propriétés des matières.

En conditions du chantier, quand aucune centrale à mortier ne se trouve dans le voisinage, on prépare le mortier dans des installations de mélange, ou bien dans des malaxeurs mobiles à action périodique ou continue.

La figure 96 représente un malaxeur à mortier à fonctionnement continu. Le ciment, le sable et la chaux en provenance des trémies *1* sont amenés par les élévateurs *2* dans les compartiments correspondants de la trémie d'alimentation *3*, d'où ils passent régulièrement dans le mécanisme de malaxage continu *4* alimenté en eau. Par l'auge *5*, le mortier est déversé dans le caisson *6*. Ce caisson est amené à pied d'œuvre à l'aide d'une grue.

On doit toujours doser très soigneusement les matériaux composant le mortier, indépendamment du procédé de préparation employé. Les indices physiques et mécaniques du mortier ainsi que son prix dépendent beaucoup des proportions relatives des divers matériaux employés.

Comme il est déjà dit, le mortier est transporté de la centrale au chantier par bennes. Sur le chantier, le mortier en container est amené à pied d'œuvre à l'aide d'une grue ou bien il est véhiculé par pompes à mortier. L'emploi de ces pompes et de tuyaux à mortier est le procédé donnant le meilleur rendement et qui demande le moins de main-d'œuvre. Mais ce mode de transport exige que les mortiers soient particulièrement fluides et qu'ils ne se stratifient pas.

CHAPITRE IX

PIERRES ARTIFICIELLES ET PRODUITS À BASE DE LIANTS

Les matériaux pierreux artificiels, que nous appellerons les pierres artificielles, et les pièces essentiellement fabriquées avec des liants n'exigent aucune cuisson en cours de fabrication. Ces divers produits acquièrent la résistance nécessaire à la suite du durcissement des liants. Les agrégats employés sont le sable quartzeux, le mâchefer, les cendres des centrales thermiques, la sciure de bois, l'armature étant l'amiante, les peignures de lin, etc. On peut classer les pierres et produits artificiels d'après le liant employé. On distingue les produits à base des liants suivants :

chaux (briques silico-calcaires, briques de laitier à la chaux et de cendres à la chaux, produits cellulaires et silicatés) ;

plâtre (plaques et panneaux de plâtre et de béton-plâtre, feuilles de revêtement) ;

liants magnésiens (xylolite, plaques de xylolite pour sols et revêtements de murs) ;

ciment Portland (éléments en béton et béton armé*, plaques et feuilles profilées en amiante-ciment pour toitures, tuyaux en amiante-ciment, etc.).

§ 1. PRODUITS À BASE DE CHAUX

a) Briques silico-calcaires

Les briques silico-calcaires (chaux-sable) sont obtenues avec un mélange de chaux et de sable siliceux cuit à la vapeur sous une certaine pression.

* Les éléments en béton et béton armé ont été étudiés en détail au chapitre VII vu leur importance particulière et leur large emploi dans les constructions modernes. Le présent chapitre ne considère que les éléments en amiante-ciment.

Le principal matériau mis en œuvre dans la fabrication des briques silico-calcaires est le sable qui entre à raison de plus de 90% en poids de la brique.

Le sable utilisé doit contenir une forte proportion de SiO_2, c'est-à-dire de silice pure. Les sables de roche, dont les grains ont des arêtes acérées et une surface rugueuse sont préférables aux sables de rivière. Ces sables doivent comprendre des grains de diverses grosseurs. Ce sont de tels sables qui ont le moins de vides partiellement comblés par de la chaux.

Pour fabriquer les briques silico-calcaires, on emploie une chaux pure à extinction rapide, d'une teneur d'environ 70% d'oxyde de calcium actif (CaO). Cette chaux ne doit pas contenir des biscuits qui s'opposent à son extinction dans les installations spéciales. La chaux avec biscuits ne s'éteint que lorsque les produits sont traités en autoclave, et l'extinction peut provoquer des fissures dans les briques.

L'emploi de matières premières remplissant les conditions précédentes permet d'obtenir des produits de qualité supérieure avec une faible consommation de chaux — le composant le plus onéreux de la pâte.

La figure 97 montre schématiquement la fabrication des briques silico-calcaires. La chaux en morceaux est tout d'abord broyée en une poudre fine. Ensuite, la chaux vive et le sable siliceux sont envoyés dans les appareils d'extinction de la chaux. On peut éteindre le mélange de chaux et de sable (5 à 8 % de chaux et 92 à 95 % de sable) soit en 8-9 heures dans des silos (premier procédé, procédé du « silo »), soit beaucoup plus rapidement dans un tambour extincteur (deuxième procédé, procédé du « tambour »).

Le tambour extincteur est un cylindre métallique creux qui tourne autour de son axe horizontal. Après avoir introduit la charge de mélange dans le tambour, on admet la vapeur, et on éteint la chaux sous une pression de 3 à 5 atm. Il faut 35 à 60 minutes pour charger le tambour, éteindre la chaux et décharger le mélange. Après extinction du mélange de chaux et de sable, la pâte obtenue est brassée dans un malaxeur à ailettes ou un broyeur mélangeur où son humidité est accrue jusqu'à 7 %. On moule les briques dans des presses sous une pression de 150 à 200 kg/cm^2.

Les presses comportent un plateau à rotation périodique sur lequel sont installés les moules. L'application de la

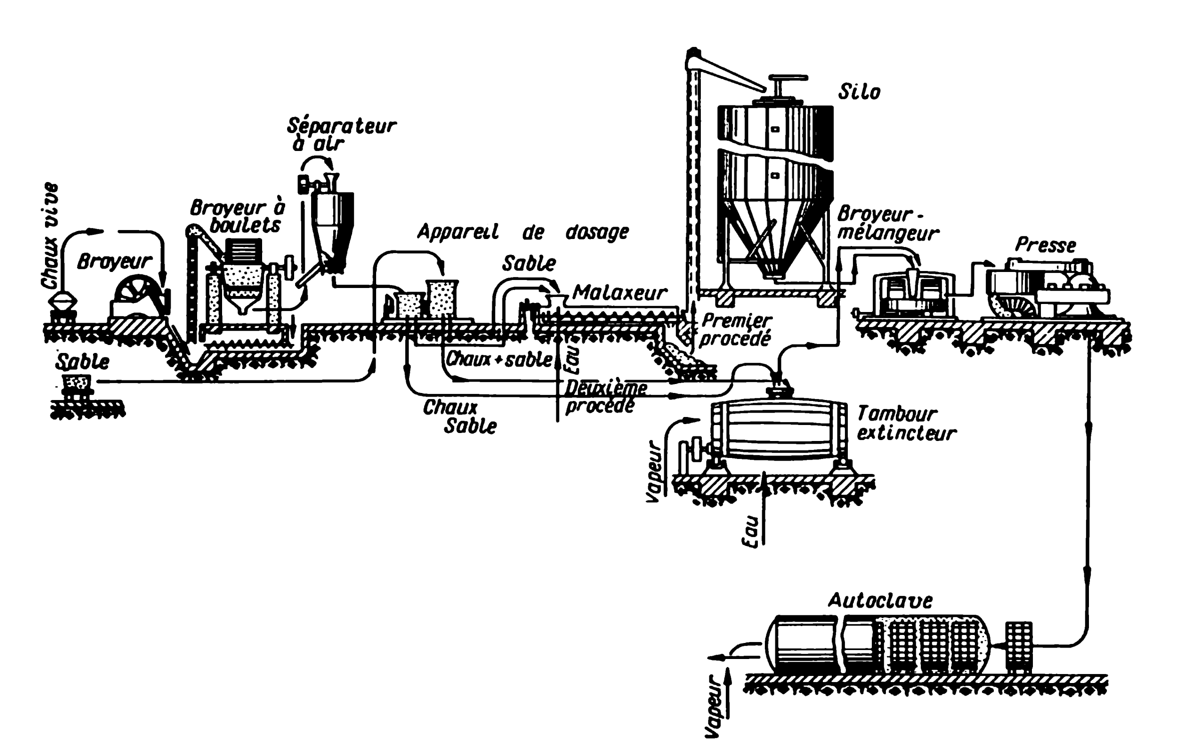


Fig. 97. Schéma de la fabrication des briques silico-calcaires

pression se fait de bas en haut au moyen d'un mécanisme à levier. La brique brute ainsi pressée sous pression acquiert une forte compacité et une certaine résistance mécanique. On enlève ensuite les briques du plateau de la presse, on les charge avec précaution sur des wagonnets et on les envoie durcir dans l'autoclave.

L'autoclave est un cylindre en acier ou en béton armé de 2,0 à 3,6 m de diamètre et dont la longueur peut atteindre 20 m. Ce cylindre est hermétiquement fermé à ses extrémités par des couvercles. On admet dans l'autoclave de la vapeur d'eau à une pression de 8 atm (à cette pression, la vapeur saturée a une température de + 175 °C).

Sous l'action de la chaleur élevée et de l'humidité, la chaux réagit avec la silice de la façon suivante :

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + (n-1)H_2O = CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O.$$

Les cristaux d'hydrosilicate de calcium qui se forment sur la surface des grains de sable s'agglomèrent énergiquement entre eux et avec les grains de sable et forment ainsi un matériau pierreux artificiel très résistant. L'étuvage de la brique brute dans l'autoclave dure de 10 à 12 h.

La dureté des briques silico-calcaires continue à augmenter après l'étuvage car une partie seulement de la chaux réagit avec la silice, la réaction ne s'effectuant que sur la surface des grains de sable. A l'air, la chaux libre se combine au gaz carbonique de l'air et se transforme en carbonate de calcium :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O.$$

Depuis quelque temps, on emploie beaucoup le procédé par désintégration pour préparer le mélange de chaux et de sable. Ce procédé a été proposé par I. Khint. Le mélange de sable et de chaux éteinte est envoyé dans un désintégrateur, où il est brassé et broyé énergiquement. Cette opération accroît considérablement la surface spécifique du sable, ce qui accélère la réaction entre la chaux et la silice et la rend plus complète. Le procédé par désintégration permet de réduire la consommation en chaux et d'accroître la résistance mécanique des briques silico-calcaires.

La forme et les dimensions des briques silico-calcaires sont les mêmes que celles des briques ordinaires en argile. Ces briques ont une couleur gris clair, mais on peut leur donner une couleur quelconque (pour les briques de pare-

ment) en ajoutant des pigments minéraux au mélange de chaux et de sable. Leur masse volumique, qui est de 1 800 à 1 900 kg/m^3 est légèrement supérieure à celle des briques ordinaires en argile. Le coefficient de conductance des briques silico-calcaires varie de 0,70 à 0,95 kcal/m·h·°C. On a adopté 5 marques de briques silico-calcaires : 75, 100, 125, 150 et 200, d'après les limites de résistance à la compression et à la flexion.

L'évolution rapide de la production et un large emploi des briques silico-calcaires dans le bâtiment s'expliquent par les avantages considérables de ces briques sur les briques en argile au point de vue technique et économique. La fabrication des briques silico-calcaires dure 15-18 heures (procédé au tambour) alors que celle des briques en argile demande 4-5 jours. Grâce à une mécanisation quasi-intégrale de la fabrication, les dépenses spécifiques en combustible conventionnel et en main-d'œuvre sont réduites d'environ 50 % ; et le prix de revient de 15 à 40 %. Les briques silico-calcaires présentent cependant certains inconvénients comparativement aux briques en argile. Elles résistent moins bien au feu et à certains agents chimiques, et leur masse volumique ainsi que leur conductance sont légèrement supérieures. Afin de réduire la masse volumique et la conductance, on fabrique des briques silico-calcaires creuses, dont les alvéoles peuvent avoir des formes et des dimensions diverses.

Les briques silico-calcaires sont mises en œuvre, tout comme les briques ordinaires en argile, dans la maçonnerie des murs porteurs et des poteaux des immeubles d'habitation, des équipements publics et des bâtiments industriels. Il faut éviter de les employer dans la construction des fondations, en particulier quand celles-ci sont exposées à l'action des eaux d'égout et des eaux souterraines.

La brique silico-calcaire n'est pas un matériau réfractaire. On ne peut pas l'employer dans les maçonneries des fours, des cheminées et autres structures soumises à des températures élevées prolongées en cours de service.

Les mortiers de chaux et sable permettent de fabriquer non seulement les briques silico-calcaires, mais encore divers autres produits tels que les pierres et même les gros blocs muraux, les dalles de planchers, les plaques de revêtement, les marches d'escaliers, etc. Pour donner à ces pièces la résistance nécessaire, il faut les mouler avec des

mortiers secs ou peu plastiques après les avoir rendus compacts par compression, damage, vibrations, etc., ceci suivi d'étuvage en autoclave. Les dalles et autres pièces destinées à supporter des efforts fléchissants sont armées dans la zone tendue avec des fils d'acier, de préférence précontraints.

Pour obtenir des pièces ayant une plus forte résistance mécanique et une meilleure résistance au gel, on broie une partie du sable. De cette façon, on accroît sa surface spécifique, et la réaction chimique entre le sable et la chaux devient plus complète.

En employant une chaux et un sable siliceux clair (presque blanc), on peut obtenir des briques de teinte claire ; en ajoutant à ce mélange des pigments minéraux (couleurs sèches), on peut obtenir des briques colorées.

b) Briques de laitier à la chaux et de cendres à la chaux

On fabrique les briques de laitier à la chaux avec un mélange de chaux et de laitier granulé des hauts fourneaux. Les proportions pondérales sont de 3 à 12 % pour la chaux, et de 88 à 97 % pour le laitier.

On prépare les briques de cendres à la chaux avec un mélange de chaux et de cendres. Les proportions sont les suivantes : 20 à 25 % de chaux et 75 à 80 % de cendres.

De même que le laitier, les cendres constituent une matière première extrêmement bon marché, obtenue en abondance par la combustion de la houille et du lignite dans les chaufferies des centrales thermiques. Lorsqu'on brûle le charbon pulvérisé, une partie des résidus de la combustion reste dans le foyer (cendres, mâchefer), et les particules les plus fines sont entraînées par les fumées. Dans les cheminées, la majeure partie des fines particules est captée et retenue par des capteurs de cendres, pour être ensuite envoyée aux terrils. Cette cendre est appelée cendre folle. Comparée à la cendre des résidus, la cendre folle est moins grosse, et l'on n'est pas obligé de la broyer. La plupart des cendres contiennent une faible quantité de CaO (5 % au maximum) et ne durcissent pas lorsque mélangées à l'eau. Mais si on leur ajoute de la chaux ou du ciment Portland, elles deviennent actives, et en traitant ensuite le mélange à la vapeur en autoclaves, on peut obtenir des briques d'une résistance suffisante. La combus-

tion de certains schistes combustibles (schistes d'Estonie, de la moyenne Volga, etc.) produit des cendres pouvant contenir 15 % ou même davantage de CaO. Ces cendres peuvent durcir sans qu'on leur ajoute de la chaux. Les briques fabriquées avec de telles cendres sont appelées des briques de *cendres au schiste.*

Il est très avantageux d'employer le laitier et les cendres pour fabriquer des matériaux de construction silico-calcaires et autres car on réduit ainsi le prix de revient de ces matériaux et l'on dispose d'une base beaucoup plus large pour s'approvisionner en matières premières. On moule les briques de laitier à la chaux et de cendres à la chaux sur les mêmes presses que les briques silico-calcaires ; ensuite, on les traite à la vapeur en autoclaves. La masse volumique de ces briques est de 1 400 à 1 600 kg/m^3, et leur coefficient de conduction varie de 0,5 à 0,6 kcal/m·h·°C. On distingue trois marques de ces briques en fonction de leur résistance à la compression : 25, 50 et 75. Leur résistance est donc beaucoup plus faible que celle des briques silico-calcaires. On emploie les briques de laitier à la chaux et de cendres à la chaux pour la maçonnerie des bâtiments de 3 niveaux au plus, ou encore pour la maçonnerie des étages supérieurs dans les bâtiments à nombreux étages.

c) Produits siliceux cellulaires

On confère aux pièces siliceuses une structure cellulaire soit mécaniquement soit chimiquement. Les produits ainsi obtenus sont appelés mousse de silicate ou gaz de silicate.

La mousse de silicate est un matériau poreux. On l'obtient en faisant durcir en autoclave un mortier plastique de chaux et sable mélangé à une mousse stable. On prépare cette mousse en battant une solution aqueuse de la substance génératrice de mousse (saponine résineuse, substance hydrolysée, etc).

Le produit que l'on obtient en mélangeant un mortier de chaux et sable avec la génératrice de mousse (poudre aluminique, perhydrol, etc.) est appelé un gaz de silicate. La génératrice de mousse réagit chimiquement avec la chaux, et le gaz ainsi produit fait foisonner le mortier et lui communique une structure poreuse.

Pour fabriquer un silicate cellulaire, on recommande d'employer de la chaux vive d'une teneur d'au moins 70 %

en CaO actif. Outre le sable siliceux, on peut également employer comme agrégats le mâchefer granulé des hauts fourneaux, les cendres des centrales thermiques, la marshallite, la terre d'infusoires, la diatomite et d'autres matériaux contenant une grande proportion de silice. La chaux et les agrégats sont broyés ensemble ou séparément. Le broyage séparé de la chaux vive et des agrégats se fait dans des broyeurs à boules et le broyage commun dans des désintégrateurs. La consommation en chaux dans la fabrication d'un silicate cellulaire est d'autant plus faible que la chaux broyée est plus fine.

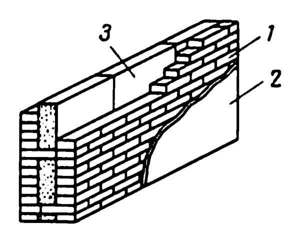


Fig. 98. Mur avec couche intercalaire calorifuge en silicate cellulaire :
1 — maçonnerie de briques ; 2 — enduit ; 3 — couche intercalaire calorifuge

La proportion de chaux est habituellement de 15 à 25 % en poids du mélange sec. Le mortier plastique de chaux et de sable que l'on obtient par ce moyen est mélangé avec la mousse ou la génératrice de gaz. Le mélange obtenu est versé dans des moules ayant la forme et les dimensions des pièces voulues. Au bout d'un certain temps, on envoie le moule contenant la masse cellulaire à demi durcie en autoclave pour être étuvé.

Les produits siliceux cellulaires ont une masse volumique variant de 300 à 1 200 kg/m³, dont dépend leur résistance mécanique (de 15 à 150 kg/cm² ou davantage). Les mousses et gaz de silicate cellulaires dont la masse volumique est de 300 à 600 kg/m³ sont des produits calorifuges et des matériaux de construction, au-delà de 600 kg/m³. Les mousses et gaz de silicate calorifuges sont employés dans les couches intercalaires servant à calorifuger les murs (fig. 98), comme isolants thermiques des conduits, et à fabriquer d'autres éléments calorifuges.

Les petits agglomérés non armés constitués par de la mousse ou gaz de silicate de construction sont employés pour le maçonnage de murs porteurs des maisons à rez-de-chaussée et à un étage. Ces agglomérés ont (50 à 90) × (25 à 40) cm et une épaisseur de 20 à 25 cm.

On emploie les pièces de grandes dimensions (gros blocs, panneaux et dalles) pour les murs extérieurs et intérieurs des immeubles d'habitation et pour les couvertures des

bâtiments industriels. Pour protéger les blocs et panneaux contre les agents atmosphériques en cours de service, on revêt leur surface extérieure d'une couche de mortier de ciment et de sable de 2 à 3 cm d'épaisseur mise en place sur le fond du moule avant de couler le mélange cellulaire. Cette couche peut être une couche de finition améliorant l'aspect si on lui ajoute des granules minéraux, des pigments ou un ciment coloré.

Pour les couvertures des bâtiments industriels, on emploie beaucoup les dalles rectangulaires et les grands panneaux armés en mousse ou gaz de silicate de construction. Ces dalles et panneaux présentent certains avantages sur les dalles ordinaires en béton armé : ils n'ont pas besoin d'être spécialement calorifugés, et d'autre part, ils sont suffisamment résistants et durables. On pose ces dalles et panneaux sur des poutres métalliques ou de béton armé, et on les recouvre avec de feuilles d'étanchéité (ruberoïd, etc.).

On fabrique la m i c r o p o r i t e avec un mélange de chaux, d'argile et de sable auquel on ajoute du verre liquide et une grande quantité d'eau (jusqu'à 250% en poids du mélange sec). Après étuvage suivi de séchage (pour évaporer l'eau), on obtient un matériau de construction résistant et léger à structure cellulaire. La microporite a une masse volumique de 300 à 900 kg/m^3 et sa résistance à la compression varie de 15 à 100 kg/cm^2. On peut l'employer dans les cloisons intérieures, les planchers ou encore comme isolant thermique à l'intérieur des bâtiments, etc. Comme la microporite est très hygrophile et résiste mal au gel, il n'est pas recommandé de l'employer dans les parties extérieures des constructions.

§ 2. PRODUITS À BASE DE PLÂTRE

La fabrication des pièces à base de plâtre présente de nombreux avantages. La rapidité du durcissement du plâtre et ses excellentes qualités de moulage permettent d'accélérer la fabrication des pièces et la cadence d'utilisation des moules. De plus, ces avantages ouvrent de larges perspectives en ce qui concerne la production d'éléments préfabriqués de grandes dimensions en matériaux de plâtre.

D'une masse volumique relativement faible, les pièces à base de plâtre ont une résistance mécanique suffisante et

une faible conductivité thermique. Ce sont de bons isolants phoniques. On peut facilement les travailler mécaniquement (sciage, découpage, perçage, etc.) et les colorer en diverses couleurs.

Les pièces à base de plâtre ont toutefois un inconvénient essentiel : elles résistent mal à l'eau. La résistance mécanique d'une pièce à base de plâtre diminue considérablement quand cette pièce est mouillée. On ne peut donc employer de telles pièces que dans des locaux secs, ou bien les mettre à l'abri de l'humidité.

On distingue les groupes suivants de pièces à base de plâtre, en fonction de leur composition :

plâtres proprement dits, fabriqués avec une pâte de plâtre à laquelle on ajoute parfois une faible proportion d'agrégats organiques ou d'agrégats minéraux broyés ;

bétons de plâtre, constitués par un mortier de plâtre ou un béton auquel on ajoute généralement des agrégats légers et poreux (mâchefer de combustion ou des hauts fourneaux, pierraille de tuf et de pierre ponce, etc.) ;

plâtres à fibres, fabriqués avec une pâte de plâtre mélangée à des matières fibreuses organiques (paille, roseau, déchets de papier, etc.).

Les pièces en plâtre soumises en service à des efforts fléchissants sont armées avec des lattes de bois ou des roseaux. Dans des pièces dont le liant est le plâtre, une armature en acier se corrode. On ne doit donc pas employer l'acier pour armer de telles pièces, ou bien il faut le protéger convenablement contre la corrosion (par exemple, en le recouvrant avec une couche de vernis bitumineux). Pour fabriquer les pièces en plâtre, en plâtre fibreux et en béton de plâtre, on emploie du plâtre de moulage à haute résistance et encore un ciment mixte de laitier au plâtre qui a une grande résistance et ne corrode pas les armatures en acier.

Les pièces les plus employées dans le bâtiment sont les plaques et panneaux pour cloisons et les plaques de revêtements muraux (plaques au plâtre).

a) Plaques et panneaux pour cloisons

On fabrique des plaques pour les cloisons en plâtre et en béton de plâtre. Leur procédé de fabrication comprend les opérations suivantes : 1) dosage des

matières premières : plâtre, agrégats, eau et ralentisseur (ou accélérateur) de prise; 2) brassage du mélange; 3) moulage des plaques ; 4) séchage des plaques. On moule les plaques par les méthodes vibratoire, par coulée et par pression.

Par coulée : la pâte plastique de plâtre (55 à 75% d'eau en poids du plâtre) est versée dans le moule sans compaction ultérieure.

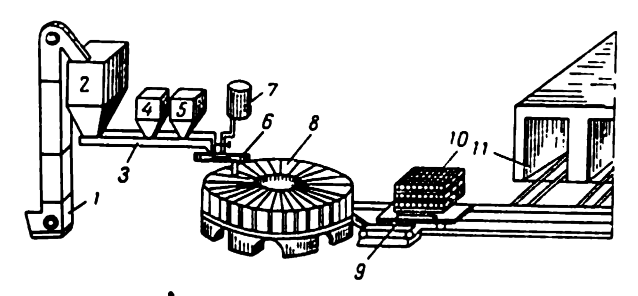


Fig. 99. Schéma de la fabrication des plaques de cloisons sur une machine à carrousel

La méthode vibratoire permet d'employer des mélanges secs (rapport eau/plâtre variant de 0,35 à 0,45) et d'ajouter jusqu'à 40% d'agrégats. Le mélange est versé dans le moule, puis compacté par vibrations.

La méthode par pression consiste à mouiller légèrement le plâtre avec de l'eau et à comprimer le mélange sous presse après l'avoir versé dans le moule. Dans ce procédé de moulage des plaques, la consommation en plâtre est relativement forte, mais cet inconvénient est compensé par une forte résistance mécanique des pièces obtenues. De plus, on évite le séchage artificiel.

La figure 99 représente schématiquement la fabrication des plaques de cloisons et leur moulage dans une machine à carrousel. Par un élévateur à godets *1* le plâtre est envoyé dans la trémie *2*, d'où un transporteur à vis *3* l'envoie dans le malaxeur à mortier de plâtre *6*. Ce malaxeur est également alimenté en agrégats (sciure ou mâchefer) et en accélérateur de prise qui proviennent des trémies *4* et *5*, ainsi qu'en eau chaude arrivant du réservoir chauffé *7*. Le mélange ainsi préparé est déversé dans un moule qui est placé sur le plateau rotatif de la machine à carrousel *8*. Dès que le moule est rempli de mélange, le plateau tour-

ne pour présenter le moule vide suivant que l'on remplit également de mortier. Le plateau fait un demi-tour pendant que le mélange versé dans un moule prend et durcit en partie. La plaque est éjectée du moule, tombe sur le transporteur *9*, puis sur le chariot *10*, qui la transporte dans le tunnel de séchage *11*.

Suivant la composition du mélange et le procédé de compaction, la masse volumique d'une plaque varie de 1 100 à 1 300 kg/m^3. La dimension des plaques en plâtre et en béton de plâtre est 80×40 cm. Les plaques en plâtre armées par des roseaux ont 150 × 40 cm. L'épaisseur des plaques varie de 90 à 100 mm. La marque d'un béton de plâtre employé pour confectionner des plaques ne doit pas être inférieure à 35 kg/cm^2. La figure 100 représente divers genres de plaques en plâtre et en béton de plâtre.

Fig. 100. Plaques à base de plâtre pour cloisons :
a — pleines ; *b* — à alvéoles ; *c* — armées avec roseaux

P a n n e a u x   e n   b é t o n   d e   p l â t r e   p o u r   c l o i s o n s. Ces panneaux diffèrent des plaques par leurs grandes dimensions et par une résistance mécanique plus élevée. Les panneaux ont la longueur d'une pièce et dans certains cas la longueur d'une partie de la pièce. Leur largeur est celle de l'étage et leur épaisseur est de 80 à 120 mm. En cours de fabrication, les bâtis dormants des portes et autres pièces sont incorporés dans certains panneaux.

A l'heure actuelle, on emploie beaucoup la méthode de laminage proposé par N. Kozlov pour fabriquer les panneaux en béton de plâtre (fig. 92).

Dans cette méthode, on moule la pièce dans une matrice en mouvement, on la compacte avec les calandres et on l'aplanit à l'aide de rubans d'acier.

Les panneaux de cloisons sont armés avec des lattes et des lambourdes qui constituent l'ossature en bois. Les ossatures préparées sont placées sur la bande inférieure du transporteur du laminoir, à une faible distance les unes des autres. Les ossatures se déplacent ainsi vers la section de coulage, mécanisme répartissant en continu le mélange de

béton de plâtre, et forment ainsi une couche de l'épaisseur requise. A mesure que le mélange avance le long du laminoir, il est compacté à l'aide de calandres. Etant donnée la lenteur de la progression (20 à 25 m/h), les panneaux acquièrent progressivement une certaine dureté, dite dureté de transport. Le durcissement des pièces se poursuit dans les chambres d'étuvage.

Le formage d'un panneau dure 15 minutes.

Malgré leurs nombreux avantages, les panneaux en béton de plâtre sont lourds (masse volumique moyenne 1 500 kg/m^3). De plus, leur étuvage s'accompagne de nombreuses difficultés techniques quand ils sont fabriqués en série.

Les meilleures pièces de grandes dimensions pour cloisons sont les panneaux en plâtre fibreux qu'on fabrique avec un mélange de plâtre, d'eau et d'agrégats fibreux. On désagrège les agrégats fibreux en fibres fines dans de l'eau avant de les mélanger au plâtre. En s'entremêlant, les fibres forment dans la pièce une ossature d'armature qui accroît sa résistance mécanique. On fabrique des panneaux en plâtre fibreux d'une masse volumique de 800 à 1 100 kg/m^3, et de 300 × 120 cm ou de 250 × 60 cm, pour une épaisseur de 50 mm. On peut facilement scier les panneaux en plâtre fibreux ou les travailler mécaniquement de tout autre façon. Les clous tiennent très bien dans ces panneaux, et il est difficile de les arracher.

On emploie les panneaux en plâtre, en béton de plâtre et en plâtre fibreux pour les cloisons intérieures des immeubles d'habitation, des équipements publics et bâtiments industriels. En cours de service, ils ne doivent pas supporter d'autres charges que leur propre poids car ils sont tout juste autoporteurs. Ces panneaux doivent être transportés et stockés en position rigoureusement verticale et être à l'abri des précipitations atmosphériques.

b) Plaques de revêtements en plâtre et plâtre fibreux

Les plaques en plâtre pour revêtements (plaques au plâtre sec) constituent un matériau de finition. Une plaque est constituée par une mince couche de pâte de plâtre durci (pierre à plâtre) revêtue sur ses deux faces par du carton solidement collé (fig. 101).

Ces plaques au plâtre sec sont fabriquées de la façon suivante. La pâte de plâtre préalablement préparée est mélangée avec une mousse (pour réduire sa masse volumique) puis versée sur une bande sans fin de carton et ensuite recouverte d'une autre bande de carton. Les deux bandes de carton et la masse de plâtre interposée sont envoyées entre les rouleaux horizontaux d'un calandre espacés d'une distance égale à l'épaisseur de la plaque.

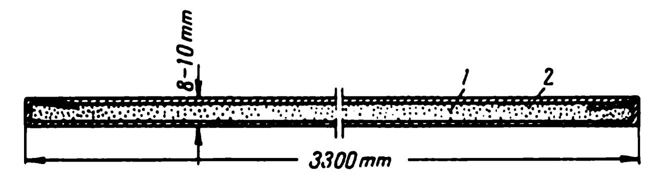


Fig. 101. Plaque au plâtre sec :
1 — pierre à plâtre ; 2 — carton

En sortant du calandre, la plaque progresse lentement jusqu'à la machine à couper. Pendant ce temps, la pâte de plâtre durcit et adhère énergiquement au carton. Dans la machine à couper, la bande durcie est sectionnée en plaques de dimensions voulues, et on les envoie dans les tunnels de séchage. Depuis la préparation du mélange jusqu'à la sortie des plaques prêtes, l'opération dure 70 à 80 mn. La fabrication des plaques au plâtre sec est complètement mécanisée et fortement automatisée, ce qui assure une productivité élevée.

Les plaques au plâtre ont des longueurs de 270 à 330 cm (c'est-à-dire la hauteur d'un étage), une largeur de 120 cm et une épaisseur de 8 à 10 mm. L'adhérence du carton à la pierre de plâtre doit être suffisamment énergique pour que le carton se déchire plutôt que de se décoller quand on veut le séparer de son support.

Les plaques au plâtre ont une résistance limite à la flexion qui n'est pas inférieure à 80 kg/cm². Leur humidité relative ne doit pas dépasser 2%.

On emploie les plaques au plâtre comme revêtement des murs, plafonds et cloisons. On ne peut les employer que dans des locaux dont l'humidité relative est normale (60% au maximum). Il est préférable de les fixer aux surfaces non pas avec des clous mais avec des mastics : mastics au bitume-silicate à une surface de pierre et mastics

de ciment-caséine à une surface de bois. L'application de ces plaques sur un mur, une cloison, etc., demande moins de travail que l'application d'un enduit qui prend du temps à sécher.

Les plaques au plâtre remplacent les enduits précédemment largement employés, simplifient et accélèrent les travaux du second œuvre.

Les plaques au plâtre présentent deux inconvénients : d'une part, une isolation phonique insuffisante, et d'autre part, les clous y tiennent mal.

Depuis quelques années, on a commencé en Union Soviétique à utiliser beaucoup un autre matériau en plaques. Il s'agit des plaques de revêtement en plâtre fibreux. On a commencé à fabriquer les plaques au plâtre fibreux parce que les plaques au plâtre ordinaire (décrites ci-dessus) consomment beaucoup de carton, matériau onéreux, qui intervient pour 60% dans leur prix de revient global. De plus, l'emploi du carton complique la méthode de fabrication. On fabrique les plaques au plâtre fibreux sans carton. Les matériaux constituant l'armature sont des agrégats organiques fibreux (débris de bois broyés, déchets de papier, etc.) qu'on ajoute au plâtre dans la proportion de 10% en poids. La résistance de ces plaques est aussi élevée que celle des plaques au plâtre collées avec du carton, leur prix étant beaucoup moins élevé.

§ 3. MATÉRIAUX ET PIÈCES À BASE DE LIANTS MAGNÉSIENS

Les liants magnésiens ont une forte résistance, comparativement aux autres liants aériens. De plus, ils adhèrent énergiquement aux matériaux en fibres de bois agglomérées, ne les détruisent pas et les rendent au contraire imputrescibles. En mélangeant un liant magnésien avec une eau de gâchage (de préférence solution aqueuse de chlorure de magnésium) et avec de la sciure ou des copeaux de bois, on obtient des matériaux de construction qu'on appelle xylolite et fibrolite (mots d'origine grecque et signifiant respectivement « pierres de bois » et « pierres fibreuses »). Les agrégats sont la sciure de bois dans la xylolite et des copeaux de bois dans la fibrolite. (La fibrolite est un isolant qui sera étudié dans le chapitre XIII).

Ces agrégats sont légers et ils ont une structure fibreuse. Ils permettent donc de réduire la masse volumique des matériaux à base de liant magnésien et d'accroître leur résistance mécanique.

La xylolite a une masse volumique de 1 000 à 1 250 kg/m³, une résistance à la compression de 300 à 400 kg/cm², une résistance à la flexion atteignant 50 kg/cm² au maximum, et un coefficient de conduction de 0,25 kcal/m·h·°C. De plus, elle possède une forte résistance à l'abrasion. Aussi, c'est un des meilleurs matériaux pour les sols. On l'emploie également comme revêtement des marches d'escaliers, des appuis de fenêtres, etc.

Les *sols en xylolite* peuvent être sans joints, ou bien être assemblés en carreaux de xylolite. Pour réaliser un sol sans joints, on applique une pâte de xylolite sur un support plan, en une ou deux couches, et on la compacte. La composition volumique de la pâte (mortier) de xylolite est la suivante : 1 : 2, 1 : 4. Autrement dit, pour une partie de poudre de magnésite caustique (ou de dolomite), on prend 2 à 4 parties de sciure et l'on gâche avec une solution aqueuse de chlorure de magnésium ayant une densité de 1,18 à 1,20 g/cm³. On brasse le mélange sur le chantier même, dans des malaxeurs à mortier. Pour obtenir un effet décoratif, on ajoute au mortier des pigments minéraux (rouge, ocre, etc.) suivant la couleur que l'on veut donner à la xylolite. Pour réduire l'usure par abrasion, on ajoute jusqu'à 20% d'amiante ou de talc.

Le support d'un sol en xylolite ne doit contenir ni chaux, ni mâchefer, ni plâtre, ni aucune matière analogue, qui réagissent chimiquement avec les liants magnésiens. Les supports pierreux, par exemple les bétons, doivent être bien secs et parfaitement durcis. Les supports de bois doivent être rigides (sans aucune flèche). La largeur des planches pour les sols ne doit pas dépasser 10 cm, afin d'éviter tout gauchissement.

Pour un durcissement normal de la xylolite, la température du local ne doit pas être inférieure à +12 °C. De plus, il faut protéger la xylolite contre l'humidité et contre un séchage trop rapide.

Suivant la surface que l'on désire obtenir, les sols en xylolite après durcissement peuvent être rugueux ou bien lisses. Pour obtenir un sol rugueux, on ponce simplement le revêtement de xylolite avec un ciment magnésien liquide.

Si ensuite on racle et on polit la surface de la xylolite, on obtient un sol lisse. Environ 1 mois après sa mise en place, on imbibe le sol d'huile de lin cuite et l'on astique à la cire.

Les sols en xylolite sont des sols chauds, insonores et ne produisant pas de poussière. Leur principal inconvénient est une résistance à l'eau relativement faible. On ne doit donc pas employer les sols en xylolite dans les locaux constamment exposés à l'humidité (établissement de bain, buanderies, toilettes, etc.)

On fabrique les carreaux et plaques de xylolite par compression sous une pression pouvant atteindre 300 kg/cm². Leur résistance à la compression est de 600 à 800 kg/cm². On peut les colorer de diverses façons. Leur surface imite souvent des roches précieuses (malachite, marbre, etc). On les appelle alors terrazzo-xylolite. Les carreaux et plaques sont posés sur un mortier préparé avec un liant magnésien ou un ciment Portland. Ils trouvent leur application pour les sols des bâtiments industriels et des édifices publics, et aussi comme revêtements.

§ 4. PRODUITS EN AMIANTE-CIMENT

a) Matériaux employés pour fabriquer les pièces en amiante-ciment

Pour fabriquer les pièces en amiante-ciment les matières premières employées sont l'amiante, le ciment Portland et l'eau.

Amiante. L'amiante est un minéral fibreux fin qui, lorsqu'on le travaille convenablement, se désagrège en fibres souples et minces, d'une épaisseur jusqu'à 0,5 micron. Ces fibres peuvent avoir des longueurs variables, depuis une fraction de mm jusqu'à 40 mm, ce qui a une grande influence sur la qualité des produits en amiante-ciment. La qualité est d'autant plus élevée que la longueur moyenne des fibres est plus grande (8 qualités en tout). Pour fabriquer les pièces en amiante-ciment on emploie l'amiante à fibres courtes, des qualités 3, 4, 5 et 6.

Les fibres d'amiante, séparées les unes des autres au cours de la désagrégation de l'amiante en morceaux, ont une résistance à la traction de 6 000 à 8 000 kg/cm². Dans une pierre de ciment, elles jouent le rôle d'armature, en

supportant la partie principale des efforts de traction. En outre, l'amiante a un grand pouvoir absorbant. Mélangé au ciment Portland et à l'eau, il adsorbe les combinaisons hydratées formées lors du durcissement du ciment, ce qui accélère considérablement le durcissement et accroît la résistance des pièces en amiante-ciment. La fabrication des pièces en amiante-ciment repose sur le pouvoir adsorbant élevé de l'amiante. L'amiante joue également le rôle d'armature dans la fabricafion des pièces.

Le ciment Portland employé dans la fabrication des pièces en amiante-ciment doit satisfaire aux conditions suivantes :

1) la résistance mécanique d'un mortier d'amiante-ciment doit croître rapidement, la durée d'un cycle de production de la pièce dépendant de la vitesse de durcissement ;

2) le début de prise ne doit pas commencer avant 2 heures comptées après le gâchage, la diminution de plasticité de la pâte avant la fin du moulage des pièces réduisant considérablement leur qualité ;

3) la finesse de mouture doit correspondre à une proportion d'au moins 92% de fines traversant le tamis 0085. Cette finesse est nécessaire si l'on veut obtenir une forte adhérence superficielle entre les particules de ciment et les fibres d'amiante;

4) la marque du ciment employé ne doit pas être inférieure à 400.

L'eau doit être pure. Ne jamais employer d'eaux provenant de marais ou de gisements de tourbe car elles contiennent beaucoup de substances organiques et de produits de décomposition de ces substances. On ne doit pas non plus employer des eaux marines fortement minéralisées.

b) Fabrication des pièces en amiante-ciment

Les propriétés techiques très avantageuses de l'amiante-ciment (résistance au feu, imputrescibilité, résistance au gel, faible perméabilité à l'eau, résistance mécanique et durée élevées) ont concouru au développement rapide de l'industrie de l'amiante-ciment. En outre, en Union Soviétique, l'existence de grandes réserves et la production toujours croissante de ciment de qualité supérieure ouvrent de larges perspectives à la fabrication de pièces nombreu-

ses et variées en amiante-ciment. On fabrique avec ce matériau les éléments de couverture (plaques planes pressées, plaques profilées ou ondulées), des tuyaux et raccords pour canalisation d'eau et d'assainissement, des gaines de ventilation, etc.

La fabrication des pièces en amiante-ciment comprend les opérations suivantes :

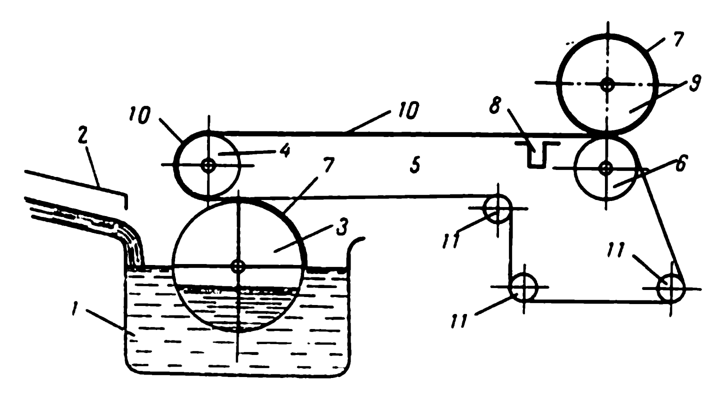


Fig. 102. Schéma de fonctionnement d'une machine de formage des feuilles ou des tuyaux

1) désagrégation de l'amiante enrichi (cet amiante est un mélange de fins agrégats (touffes de fibres) qui ont été séparés de la roche) ;
2) préparation de la pâte d'amiante-ciment ;
3) moulage des pièces avec cette pâte ;
4) durcissement des pièces moulées ;
5) usinage mécanique des pièces.

L'amiante enrichi qui arrive à l'usine est désagrégé, généralement par voie humide, dans des broyeurs, puis dans des machines dites hollanders. Après désagrégation de l'amiante dans le hollander, on ajoute le ciment Portland et l'eau, et l'on brasse la pâte d'amiante-ciment. Pour fabriquer des feuilles d'amiante, on prend 9 à 18 % d'amiante en poids et 82 à 91 % de ciment. Dans la fabrication des tuyaux, la proportion d'amiante peut atteindre 21 %. La pâte de ciment d'amiante ainsi préparée est envoyée dans la machine de formage des feuilles ou des tuyaux. La figure 102 représente schématiquement le fonctionnement d'une telle machine. La pâte d'amiante-ciment très fluide (géné-

ralement 90 à 95% d'eau) est envoyée en continu dans la cuve métallique *3* par l'auge *2*. La cuve contient un tambour grillagé creux *3* recouvert d'une toile métallique tendue. La bande du convoyeur *5* est appliquée à la surface de ce tambour par l'arbre *4*. Le cylindre d'entraînement *6* entraîne la bande qui à son tour fait tourner le cylindre grillagé. La pâte d'amiante-ciment se dépose en couche mince *7* sur la surface de la toile métallique du tambour où elle perd une partie de son eau par filtration à travers cette toile, puis elle est enlevée par la courroie porteuse mobile. Sur cette courroie, elle traverse le compartiment à vide *8*, perd encore une partie de son eau, puis elle passe sur le tambour rotatif de formage *9*, sur lequel elle s'enroule en couches successives.

Pour fabriquer des plaques, la pâte enroulée et d'épaisseur requise est sectionnée le long d'une génératrice du tambour. Ensuite, on l'enlève du tambour et on la découpe en plaques de dimensions requises. Si l'on fabrique des plaques planes, on envoie les feuilles dans une presse hydraulique où on les comprime sous une pression de 300 à 400 kg/cm². Pour la fabrication de plaques profilées, la pâte n'est pas comprimée dans des presses mais placée dans un moule métallique où elle est pressée par des rouleaux. Les pièces moulées sont soumises à un étuvage de 12 à 16 h, après quoi on les travaille mécaniquement (on ébarbe les arêtes, perce les trous, etc.).

Après un séjour de 5 à 7 jours dans un magasin chauffé, les pièces en amiante-ciment sont livrées à l'usager.

Pour fabriquer des tuyaux, on utilise des machines de formage comportant des tambours amovibles de formage dont le diamètre détermine le diamètre intérieur du tuyau fabriqué. La pâte d'amiante-ciment qui s'enroule sur ces cylindres est compactée uniformément à sa partie supérieure par des rouleaux, ce qui la comprime pour produire une masse monolithe. A la fin de l'enroulement, on enlève le tambour intérieur et la masse enroulée, et l'on installe un tambour neuf. Après un certain temps de repos, on sépare du tambour le tuyau formé et on l'envoie à l'étuvage pour accélérer le durcissement. Ensuite, on sèche et on travaille les tuyaux mécaniquement (ajustement et sectionnement des extrémités, etc.). Pour donner aux tuyaux leur dureté définitive, on les conserve pendant au moins 12 jours dans un magasin chauffé.

Depuis quelque temps, on traite les pièces en amiante-ciment en autoclave, pour accélérer leur durcissement. Le traitement en autoclave permet de supprimer le séjour des pièces dans le magasin de l'usine et d'employer un ciment de sable que l'on obtient en broyant ensemble du clinker de ciment Portland et du sable siliceux. Le traitement des pièces en amiante-ciment par la vapeur en autoclave réduit considérablement la durée de fabrication. De plus, l'emploi du ciment de sable réduit d'environ 50% la consommation en clinker de ciment Portland.

c) Diverses variétés de pièces d'amiante-ciment ; propriétés et emplois

En fonction de leur emploi, on classe les carreaux plans de couverture en carreaux ordinaires de rangées, en carreaux de bordure et en carreaux de frise (fig. 103). Les carreaux ont tous une épaisseur de 4 mm, leurs autres cotes étant les suivantes : 400 × 400 mm pour les carreaux ordinaires, 400 × 333 mm pour les carreaux de bordure, 400 × 200 mm pour les carreaux de frise. Les carreaux et leurs faîtages ne doivent comporter ni fissures ni angles brisés. La résistance limite à la flexion dans une direction quelconque ne doit pas être inférieure à 240 kg/cm^2. L'absorption d'eau des carreaux ne doit pas dépasser 18% en poids.

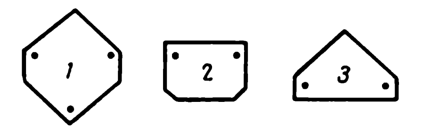


Fig. 103. Carreaux plans d'amiante-ciment pour toitures : 1 — carreaux ordinaires ; 2 — plaques de frise ; 3 — plaques de bordure

Dans les essais de résistance au gel, les carreaux doivent supporter au moins 25 cycles de gel à —15 °C au moins, et de dégel dans de l'eau à 10-20 °C, sans présenter aucun indice de détérioration (ségrégation, fissuration, émiettement). Le parement peut être soit peint avec une peinture résistant aux agents atmosphériques soit laissé brut. On emploie les carreaux pour les toitures des immeubles d'habi-

tation et édifices publics. Ils sont posés sur planches ou voliges.

Les plaques profilées pour toitures peuvent être ondulées (profil ordinaire et profil renforcé) ou semi-ondulées (fig. 104). Elles peuvent être colorées ou non. Les plaques ondulées à profil ordinaire ont une longueur de 120 cm et une largeur d'environ 70 cm avec une épaisseur pouvant atteindre 6 mm. Les plaques ondulées

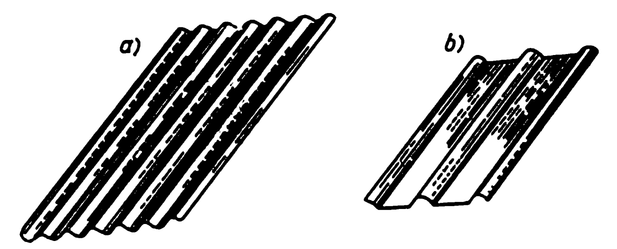


Fig. 104. Plaques profilées d'amiante-ciment :
a — ondulées ; b — semi-ondulées

à profil renforcé sont un peu plus épaisses, ce qui permet de leur donner de plus grandes dimensions. Elles ont en effet des longueurs de 175 et 200 cm, une largeur d'environ 100 cm et une épaisseur de 8 mm. Les plaques semi-ondulées ont des dimensions de 120 × 55 cm et 80 × 55 cm, avec une épaisseur de 6 mm.

Les plaques profilées doivent être rigoureusement rectangulaires, sans fissures et éclats. La résistance à la flexion doit être d'au moins 140 kg/cm² pour les plaques demi-ondulées et les plaques ondulées à profil ordinaire, et d'au moins 180 kg/cm² pour les plaques à profil renforcé. L'absorption d'eau ne doit pas dépasser 30%. De même que les carreaux plans, les plaques profilées sont utilisées pour les toitures des immeubles d'habitation, édifices publics et bâtiments industriels.

Les toitures d'amiante-ciment ont une masse volumique faible ; elles ne rouillent pas et n'ont pas besoin d'être peintes périodiquement. Elles sont incombustibles et résistent bien aux agents atmosphériques.

Les inconvénients essentiels des carreaux et plaques des toitures (et aussi de toutes les pièces d'amiante-ciment) sont leur fragilité, leur faible résistance aux chocs et leur tendance au gauchissement.

P l a q u e s   p l a n e s   d e   r e v ê t e m e n t. On fabrique trois types différents de ces plaques, qui sont : les plaques non pressées, les plaques pressées et les plaques pressées à texture décorative. Dimensions des plaques non pressées : longueur de 60 à 160 cm, largeur de 30 à 120 cm, épaisseur de 6 à 10 mm. Les plaques pressées ont 60 à 120 cm de longueur, 30 à 80 cm de largeur, et 4 à 8 mm d'épaisseur. L'absorption d'eau (en poids) ne doit pas dépasser 30% dans les plaques non pressées et 21% dans les plaques pressées. La résistance à la flexion des plaques non pressées doit être d'au moins 150 kg/cm² et des plaques pressées d'au moins 200 kg/cm².

On emploie les plaques planes d'amiante-ciment pour les revêtements extérieurs et intérieurs des murs de maçonnerie et des ossatures, pour les cloisons et plafonds de divers bâtiments.

Les plaques d'amiante-ciment sont stockées dans des locaux ou bien sous auvents. Pour transporter les plaques, on les empile en position horizontale ; et on les cale de façon qu'elles ne puissent pas se heurter ni heurter les bords du véhicule utilitaire. Les plaques ne doivent subir aucun choc au chargement et au déchargement.

Les p a n n e a u x   d ' a m i a n t e - c i m e n t sont des pièces de grandes dimensions à trois couches, constituées par deux plaques planes d'amiante-ciment entre lesquelles on interpose une matière calorifuge, généralement une laine minérale. On donne à ces panneaux les dimensions d'une chambre, c'est-à-dire une hauteur de 270 cm, une largeur de 320 cm et une épaisseur de 12 à 16 cm (variable avec la matière calorifuge employée). Les bâtis des portes et des fenêtres sont incorporés en cours de fabrication.

On emploie les panneaux d'amiante-ciment pour les murs extérieurs des immeubles d'habitation et des édifices administratifs.

On emploie les t u y a u x   d ' a m i a n t e - c i m e n t pour les canalisations sous haute et basse pressions (pour eaux ordinaires, minéralisées et marines), pour les canalisations d'évacuation d'eau diverses (eaux ménagères, pluie, eaux industrielles), ainsi que pour les pipe-lines, les conduits de gaz, les conduits de ventilation, etc.

Les tuyaux d'amiante-ciment employés dans les réseaux d'eau et d'assainissement souterrains durent beaucoup plus longtemps que les tuyaux en fonte ou en acier.

Ces tuyaux ne sont pas détériorés par les courants vagabonds, qui accélèrent considérablement la corrosion des tuyaux métalliques. Comparativement aux tuyaux métalliques, les tuyaux d'amiante-ciment résistent mieux aux eaux marines, minéralisées, etc. Le coefficient de frottement d'un liquide sur la surface lisse des tuyaux d'amianteciment est plus faible que sur la surface des tuyaux métalliques, ce qui accroît le débit et réduit la consommation en énergie électrique nécessaire au pompage des liquides.

Les tuyaux d'amiante-ciment résistent bien à l'écrasement. Ils peuvent supporter une pression hydraulique de service jusqu'à 12 atm ou même davantage, du fait que les fibres d'amiante, qui ont une grande résistance à la traction, sont disposées généralement non pas dans le sens de la longueur du tube mais suivant la circonférence.

Les *tuyaux d'eau* (*sous pression*) sont employés dans les conduites d'eau sous une pression hydraulique de service de 3, 6, 9 et 12 atm. On a défini quatre marques ou qualités de tuyaux d'amiante-ciment en fonction de la pression de service de l'eau dans les conduites :

BT 3, pression de service inférieure à 3 atm ;
BT 6, pression de service inférieure à 6 atm ;
BT 9, pression de service inférieure à 9 atm ;
BT 12, pression de service inférieure à 12 atm.

Les tuyaux d'amiante-ciment pour les conduites d'eau ont une longueur de 295 à 395 cm et un diamètre intérieur variant de 5 à 50 cm. L'épaisseur de leur paroi varie de 18 à 50 cm. Ces tuyaux doivent être rectilignes, rigoureusement cylindriques, avoir une surface intérieure lisse et non fissurée et être absolument imperméables à l'eau. Les essais d'imperméabilité à l'eau consistent à refouler dans les tuyaux de l'eau sous pression ; on fait croître progressivement cette pression jusqu'au double de la pression de service (jusqu'à 8 atm, pour les tuyaux de la marque BT 3). Au cours de ces essais, on ne doit apercevoir à l'extérieur aucun indice de suintement (fuites, buées, taches sombres, etc.).

Les *tuyaux ordinaires* (*c'est-à-dire sans pression atmosphérique*) ont des longueurs de 250, 300 et 400 cm, un diamètre intérieur jusqu'à 60 cm, et une épaisseur de paroi de 7 à 18 mm.

Pour raccorder les tuyaux d'eau et d'assainissement d'amiante-ciment, on a recours à des manchons d'amiante-ciment. Les joints des manchons sont réalisés en éléments d'étanchéités élastiques, c'est-à-dire en bagues de caoutchouc à section circulaire, et l'on bourre le jeu entre le manchon et le tuyau avec un mortier de ciment (ciment expansif,

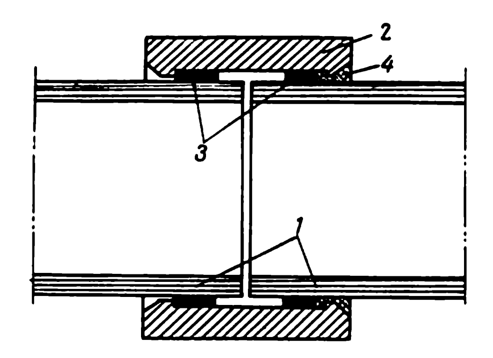


Fig. 105. Raccordement de deux tuyaux d'amiante-ciment à l'aide d'un manchon :
1 — tuyaux ; 2 — manchon ; 3 — bagues de caoutchouc; 4 — bourrage de mortier de ciment

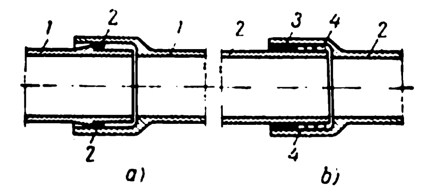


Fig. 106. Emboîtement de deux tuyaux d'amiante-ciment :
1 — tuyaux ; 2 — bagues de caoutchouc ; 3 — coulis de ciment; 4 — joint

fig. 105). La figure 106 montre un emboîtement de deux tuyaux.

On emploie également l'amiante-ciment pour les conduits de ventilation, les chéneaux d'évacuation d'eau, etc.

Les conduits de ventilation peuvent avoir une section soit circulaire de 30 cm de diamètre au maximum, soit rectangulaire de 20 × 30 ou 40 × 50 cm, et une longueur atteignant 400 cm (fig. 107).

A côté de leurs nombreux avantages, les tuyaux d'amiante-ciment ont un inconvénient essentiel, qui est leur fragilité. Aussi, toutes les manutentions doivent-elles

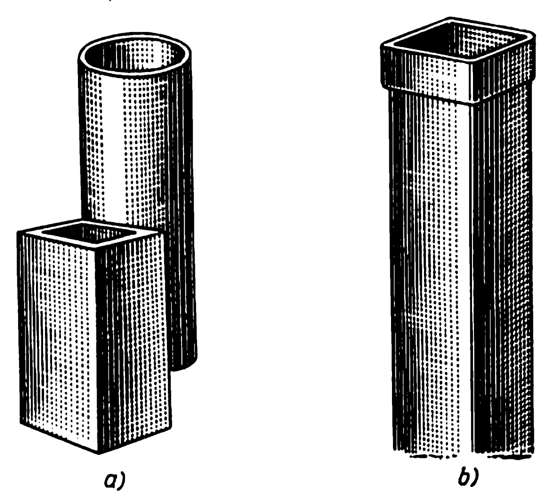


Fig. 107. Conduits de ventilation d'amiante-ciment :
a — sans évasement ; *b* — avec évasement

être faites avec précaution. Pour les stocker, il faut les placer sur une aire plane et les empiler en tenant compte des diamètres et des marques.

CHAPITRE X

BOIS

§ 1. GÉNÉRALITÉS

Le bois possède une résistance mécanique relativement forte pour une masse volumique faible, une bonne élasticité et une faible conductivité thermique. Il peut durer très longtemps en cas d'utilisation dans de bonnes conditions.

Le bois est largement utilisé dans le bâtiment grâce aux avantages cités et à son prix modéré.

Le bois présente cependant des inconvénients très importants comme matériau de construction. Il faut signaler en particulier l'hétérogénéité de sa structure, l'hygroscopicité, la putrescibilité et la combustibilité.

L'hétérogénéité de la structure se manifeste par le fait que la résistance mécanique et la conductivité thermique n'ont pas les mêmes valeurs dans le sens des fibres et dans le sens perpendiculaire. Il en résulte certaines difficultés dans l'emploi du bois pour les constructions.

Les matières dont les propriétés physiques diffèrent avec le sens considéré sont appelées des matières *anisotropes*.

L'hygroscopicité du bois est sa propriété d'absorber ou de dégager (par évaporation) de l'eau quand l'humidité et la température du milieu extérieur varient. Quand l'humidité augmente, le volume du bois augmente également, et inversement (contraction de séchage). Par suite de l'anisotropie, les variations de dimensions qui en résultent ne sont pas les mêmes dans les divers sens. Il en résulte des contraintes internes qui provoquent des fissurations et un gauchissement.

La putrescibilité consiste dans le fait que la matière est détruite progressivement par l'action de micro-organismes inférieurs. Le bois qui se trouve dans de mauvai-

ses conditions est affecté de ce défaut (en particulier dans une humidité élevée).

C o m b u s t i b i l i t é. Les constructions en bois sont dangereuses au point de vue de l'incendie si l'on ne prend pas des dispositions spéciales pour les protéger.

En outre, le bois est caractérisé par u n e g r a n d e v a r i a b i l i t é d e s c a r a c t é r i s t i q u e s d e r é s i s t a n c e m é c a n i q u e, même à l'intérieur d'une même espèce. Cette variabilité dépend des conditions de croissance et de la présence de divers défauts dans le bois.

Les constructeurs doivent bien connaître les qualités et les défauts du bois, de façon à pouvoir atténuer ses défauts et mettre à profit au maximum ses qualités.

§ 2. STRUCTURE DES ARBRES; STRUCTURE DU BOIS

On peut étudier la structure du bois à l'œil nu ou bien avec des instruments grossissants.

La structure visible à l'œil nu ou sous un faible grossissement (à travers une loupe) est la *macrostructure*. La structure visible seulement sous un fort grossissement (microscope) est la *microstructure*.

a) Macrostructure

Il est bon d'étudier la macrostructure suivant trois plans de section d'un tronc d'arbre (fig. 108). Un plan de section parallèle à l'axe du tronc à une certaine distance de cet axe est appelé section *tangentielle* (*3*) ; un plan de section perpendiculaire à l'axe du tronc est une section *transversale* (*1*) ; un plan de section passant par l'axe du tronc est une section *radiale* (*2*).

Quand on examine une section transversale d'un arbre, on peut distinguer les divers éléments indiqués sur la figure 109. L'écorce, dont la couche extérieure est constituée par le liège et la couche intérieure par le liber, protège l'arbre contre les coups.

Au cours de la croissance de l'arbre, la couche de liber véhicule les substances nutritives en les faisant descendre depuis la couronne de l'arbre. C'est cette couche qui contient les réserves de substances nutritives. Sous le liber se trouve une couche mince, appelée c a m b i u m, qui

est constituée par des cellules vivantes. La face extérieure du cambium (côté liber) est garnie de cellules de liber, et la face intérieure, tournée vers le centre de l'arbre, est garnie de cellules de bois, ou cellules ligneuses. Les cellules ligneuses qui se séparent du cambium sont plus nombreuses que les cellules de liber, si bien que le bois croît plus rapidement que l'écorce.

La masse épaisse de bois qui se trouve à l'intérieur du cambium est constituée par une série de couches minces

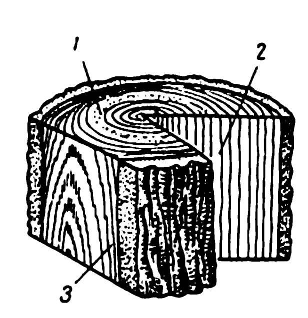


Fig. 108. Principaux plans de coupe d'un tronc d'arbre

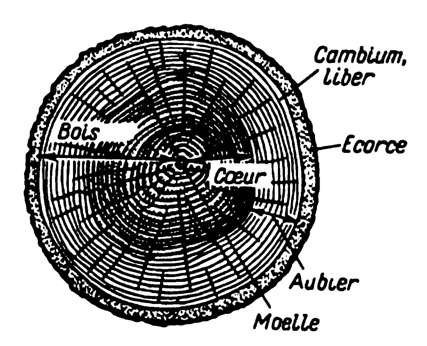


Fig. 109. Structure de l'arbre vue sur la coupe transversale d'un tronc d'arbre

et concentriques. Sur la coupe transversale de certaines espèces, on distingue très nettement une région extérieure dans le bois, qui est l' a u b i e r, et une région intérieure qui est le c œ u r. L'aubier est constitué par les cellules les plus jeunes, le cœur étant constitué de cellules complètement mortes.

Dans certaines espèces (pin, chêne, cèdre), le cœur est plus sombre que l'aubier. Dans d'autres espèces (épicéa, sapin, hêtre), la partie centrale du bois a toutes les caractéristiques du cœur, mais elle a la même couleur que la partie périphérique. Un tel bois est appelé un b o i s m û r. Il existe des espèces appelées bois d'aubier, sans cœur (bouleau, érable, aune).

En partant de ces diverses caractéristiques, on peut classer les variétés de bois comme suit : b o i s d e c œ u r, à cœur et à aubier ; b o i s d' a u b i e r, sans cœur, constitués uniquement de bois d'aubier ; et b o i s m û r s, constitués de bois mûr et d'aubier.

Sur toute la longueur du tronc, on trouve dans sa partie centrale, la m o e l l e, qui est constituée par des cellules faiblement liées les unes aux autres et possédant de minces enveloppes. La moelle et le bois qui se forme pendant la première année de croissance constituent le tube médullaire d'un diamètre de 1 à 10 mm en fonction de l'espèce et de l'âge de l'arbre. Cette partie du tronc est la plus faible.

Sur une section transversale d'un tronc d'arbre, on peut voir à l'œil nu de nombreuses couches concentriques. Chacune de ces couches correspond à une année de croissance de l'arbre. C'est pourquoi on les appelle des c o u c h e s a n n u e l l e s.

Au printemps, se forment les cellules à parois minces qui constituent le bois précoce (bois de printemps) de la couche annuelle, alors qu'en été, il y a formation de cellules robustes, à parois épaisses, qui constituent le bois tardif (bois d'été). La figure 110 montre une section radiale, ou méridienne, une section transversale et une section tangentielle dans du bois de pin. On voit très nettement sur ces sections la différence qui existe entre les tissus constitués par le bois précoce et le bois tardif.

La largeur des couches annuelles n'a pas autant d'influence sur les propriétés du bois que la proportion de bois tardif contenue dans ces couches. C'est en effet le bois tardif qui est le plus précieux au point de vue mécanique.

Dans les variétés feuillues, l'humidité circule dans des vaisseaux (tubes) disposés le long du tronc. Sur une section transversale du tronc, ces vaisseaux apparaissent comme des orifices circulaires.

Le bois de certaines variétés feuillues (chêne, frêne, orme) contient des v a i s s e a u x gros et petits. Les gros vaisseaux se trouvent dans la partie précoce de la couche annuelle, tandis que les vaisseaux fins sont groupés ou bien répartis uniformément dans la partie tardive (fig. 111). Ces variétés sont appelées e s p è c e s à c e r c l e s d e v a i s s e a u x.

D'autres variétés feuillues (bouleau, tremble, tilleul) n'ont pas de gros vaisseaux, si bien qu'il n'existe pas de différence nette entre la partie précoce et la partie tardive d'une couche annuelle. Ces variétés sont appelées les v a r i é t é s à v a i s s e a u x d i s p e r s é s (fig. 112).

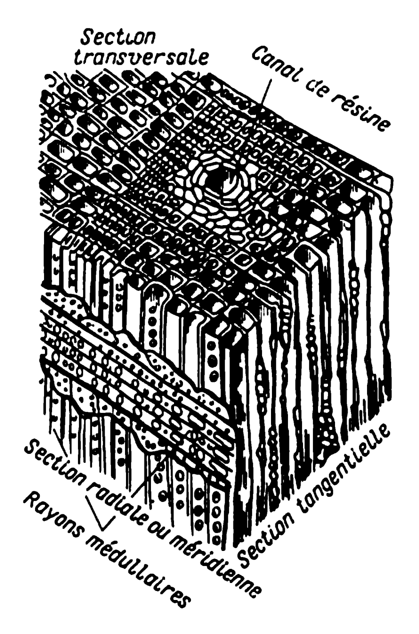


Fig. 110. Vue des trois plans de section principaux dans du bois de pin

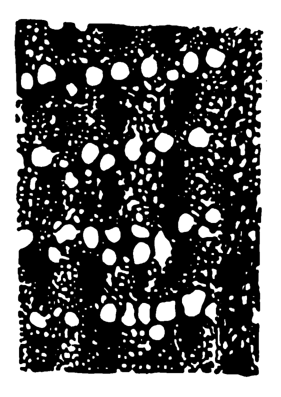


Fig. 111. Structure d'une variété de bois à cercles de vaisseaux

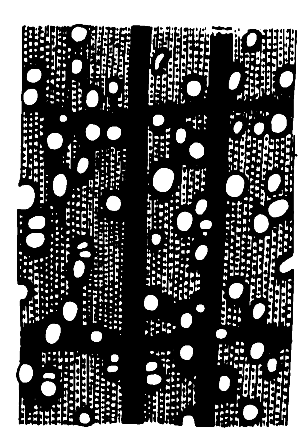


Fig. 112. Structure d'une variété de bois à vaisseaux dispersés (érable)

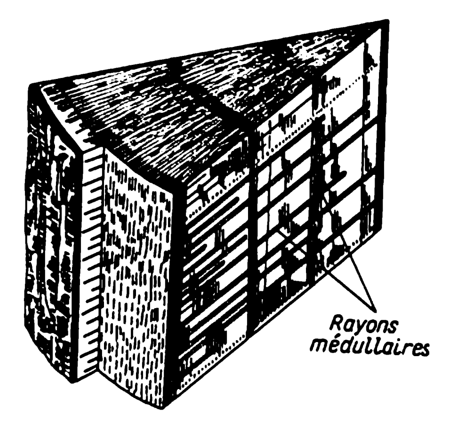


Fig. 113. Disposition des rayons médullaires dans le chêne

Les bois des conifères n'ont pas de vaisseaux. Ils sont constitués essentiellement par des cellules longues et fermées (trachéides). Dans la plupart de ces variétés, on observe entre les trachéides, et principalement dans les parties tardives des couches annuelles, des canaux de résine, c'est-à-dire des espaces intercellulaires qui sont remplis par de la résine (fig. 110).

En dehors des couches annuelles, on peut également observer à l'œil nu sur une section transversale certaines bandes étroites qui sont dirigées suivant des rayons. Ces bandes sont les rayons médullaires. Sur une coupe radiale de chêne, elles constituent des bandes relativement larges (fig. 113). La forme et la disposition de ces rayons médullaires permettent le mieux de différencier les nombreuses variétés de bois.

b) Microstructure

Dans un microscope, on peut voir que le bois est constitué par un très grand nombre de cellules vivantes et mortes de grandeurs et formes variées.

Toutes les cellules vivantes comprennent une enveloppe et, à l'intérieur de cette enveloppe, du protoplasme, du suc cellulaire et un cœur. Les protoplastes, c'est-à-dire le protoplasme et le cœur, constituent les organes essentiels de toutes les cellules vivantes.

Le protoplasme est une albumine végétale, comprenant 35 à 45% de matières sèches en poids, et constituée de l'hydrate de carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote et du soufre. Le protoplasme contient au moins 70% d'eau.

Par sa composition chimique, le cœur se rapproche du protoplasme, mais il en diffère par le fait qu'il contient du phosphore et qu'il a une plus forte densité. Les cœurs ont des formes diverses, le plus souvent ovales. Le cœur a une consistance plus visqueuse que le protoplasme.

L'enveloppe cellulaire est constituée principalement par une substance polymère à poids moléculaire élevé, appelée la cellulose, c'est-à-dire par une substance cellulaire : $n(C_6H_{10}O_5)$. Au cours de la croissance, l'enveloppe cellulaire subit une transformation extrêmement importante, la lignification, qui consiste dans l'apparition de la lignine dans la substance de l'enveloppe. Les cellules

du bois remplissent des fonctions physiologiques diverses. On distingue les cellules conductrices, les cellules mécaniques et les cellules-magasins, ou cellules de réserve.

§ 3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU BOIS

a) Humidité et hygroscopicité

L'humidité d'un bois a une grande influence sur ses propriétés.

On définit l'humidité W par la formule suivante :

$$W = 100 \cdot \frac{G_1 - G_2}{G_2}, \text{ en } \%, \qquad (39)$$

G_1 étant le poids de l'échantillon de bois avant séchage ; G_2 le poids de l'échantillon séché jusqu'à un poids constant.

Une humidité de 15% en poids est considérée comme normale. Pour permettre des comparaisons, les résultats des mesures de toutes les propriétés physiques du bois doivent être référés à cette humidité.

Dans l'humidité du bois, on distingue l'humidité libre, qui remplit les cavités des cellules, les vaisseaux et les espaces intercellulaires, et l'humidité hygroscopique, qui se trouve dans les parois des cellules et des vaisseaux sous forme de couches d'épaisseur microscopique.

D'après le degré d'humidité, on distingue les bois suivants : 1) bois humides (humidité supérieure à celle du bois fraîchement abattu) ; 2) humidité d'abattage (35% et davantage) ; 3) humidité dite « sec à l'air » (15 à 20%) ; 4) humidité dite « sec en chambre » (8 à 13%).

Au cours du séchage, le bois perd tout d'abord son humidité libre. C'est seulement ensuite qu'il commence à perdre l'humidité hygroscopique. Le taux maximal possible d'humidité hygroscopique dans un bois est appelé le *point* ou humidité de saturation des fibres. Cette caractéristique varie entre des limites relativement étroites (23 à 31%) dans les bois de diverses variétés. Au cours du séchage du bois, l'humidité s'évapore de la surface des couches extérieures, et l'humidité des couches intérieures passe dans les couches extérieures.

L'humidité d'un bois qui a séjourné pendant longtemps dans une atmosphère à humidité et température constan-

tes est appelée **humidité d'équilibre** du bois. Le bois atteint cette humidité d'équilibre quand la tension de la vapeur d'eau du milieu ambiant est égale à la tension de la vapeur d'eau à la surface du bois.

Pour déterminer l'humidité d'un bois conservé dans un local d'une température et d'une humidité données,

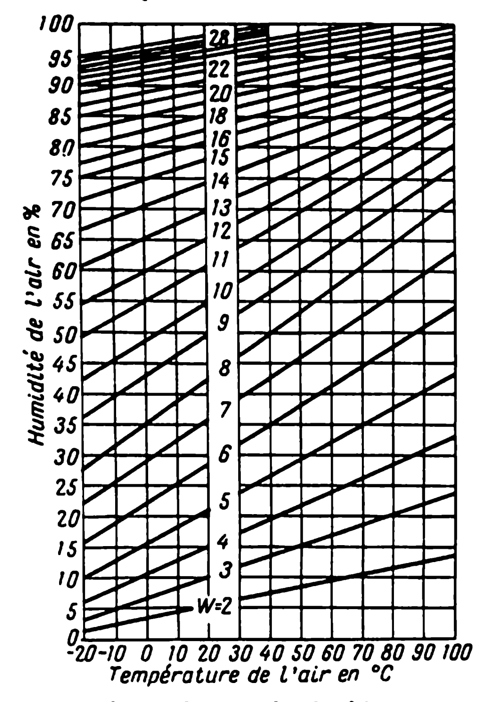


Fig. 114. Graphique de N. Tchoulitski, servant au calcul de l'humidité du bois

N. Tchoulitski a établi un graphique (fig. 114) qui permet de calculer l'humidité du bois avec une précision de 0,75%. Sur ce graphique, on a porté en ordonnées l'humidité de l'air et en abscisses la température de l'air. Chacune des droites correspond à une valeur de l'humidité du bois.

Par suite de l'hygroscopicité du bois, l'humidité des pièces en bois varie avec la température et l'humidité du milieu ambiant. Un bois humide cède de l'humidité au milieu ambiant, et un bois sec absorbe de l'humidité provenant de ce milieu.

Comme l'humidité de l'air est toujours variable, l'humidité du bois varie également. Une variation de l'humidité du bois depuis 0% jusqu'au point de saturation des fibres fait varier le volume du bois, ce qui provoque des phénomènes de contraction, de gonflement et de déformation ou gauchissement du bois dans les charpentes des constructions. Cela peut également provoquer des fissurations.

L'un des procédés les plus simples pour atténuer l'hygroscopicité et l'absorption d'eau par le bois, consiste à recouvrir la surface par des peintures ou des vernis qui s'opposent mécaniquement à la pénétration de l'humidité. Mais ces revêtements ne protègent le bois que pendant peu de temps. On peut stabiliser le bois pendant longtemps par un traitement thermique ou par un traitement chimique spécial.

b) Contraction (de séchage), gonflement et déformation du bois

Le bois fraîchement abattu peut absorber encore une certaine quantité d'eau. Dans ce cas, les dimensions linéaires et le volume de ce bois ne varient pas, bien que son poids augmente. Cette constance des dimensions se maintient également lorsque le bois se dessèche jusqu'au point de saturation des fibres. Si l'humidité diminue au-dessous de ce point de saturation, le bois commence à se dessécher : ses dimensions linéaires, et par suite son volume diminuent.

Lorsqu'un bois sec devient plus humide jusqu'à atteindre le point de saturation des fibres, l'épaisseur des parois des cellules augmente (les cellules gonflent). Il en résulte que les dimensions extérieures du bois humide augmentent également.

Comme la structure du bois n'est pas homogène, les variations de dimensions du bois au cours du séchage ou du gonflement ne sont pas les mêmes dans tous les sens. Dans le sens des fibres, la contraction linéaire totale par séchage ne dépasse pas 0,1 à 0,3%, tandis qu'elle atteint 3 à 6% dans le sens radial et 7 à 12% dans le sens tangentiel.

Comme la contraction par séchage résulte d'une diminution d'épaisseur des parois cellulaires, un bois dont les cellules ont des parois épaisses se contracte plus forte-

ment au séchage qu'un bois dont les cellules ont des parois minces. La contraction de séchage des bois compacts, c'est-à-dire des bois lourds, est donc supérieure à celle des bois tendres, c'est-à-dire légers.

On exprime la contraction de séchage par le coefficient de contraction ou retrait volumique, c'est-à-dire par la diminution de volume correspondant à une diminution d'humidité relative de 1% entre le point de saturation des fibres et l'état absolument sec.

On calcule la contraction volumique avec une précision de 0,1% par la formule suivante :

$$y_0 = 100 \cdot \frac{(V_1 - V_2)}{V_2}, \text{ en } \% \qquad (40)$$

V_1 et V_2 étant les volumes de l'échantillon avant et après séchage.

Le coefficient de contraction ou retrait volumique K_0 est donné (avec une précision de 0,01%), par la formule

$$K_0 = \frac{y_0}{W} \qquad (41)$$

W étant l'humidité de l'échantillon en %. Cette humidité ne doit pas dépasser le point de saturation des fibres.

La contraction de séchage et le gonflement du bois peuvent affaiblir très sensiblement les charpentes, parce que la contraction fait apparaître des vides aux jonctions entre les divers éléments des charpentes en bois, tandis qu'au contraire ces éléments augmentent de volume quand leur humidité augmente. Il faut donc employer le bois dans un état d'humidité qui correspond aux conditions futures de son emploi dans la construction envisagée.

Comme la contraction de séchage est plus grande dans le sens tangentiel que dans le sens radial, les bords des planches s'incurvent dans le sens de la convexité des couches annuelles (fig. 115). Les planches qui s'incurvent le plus de cette façon sont celles qui sont situées dans le voisinage de la surface du tronc car dans cette région la contraction de retrait tangentielle est plus grande que dans les couches centrales. Une planche sciée dans le milieu d'un tronc ne s'incurve pas, parce que les contraintes sont réparties symétriquement ; mais sa section prend légèrement la forme d'un coin parce que la contraction de séchage est plus forte sur les bords que dans la région centrale.

Si la surface d'une pièce de bois sèche rapidement, le volume de la couche extérieure diminue si bien que cette couche exerce une pression sur les couches intérieures. Cette couche extérieure subit donc des efforts de traction qui provoquent des fissures. Ces fissures peuvent également résulter d'une inégalité des contractions de séchage dans les divers sens.

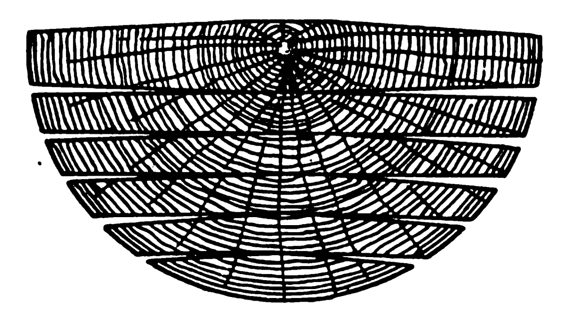


Fig. 115. Contraction de séchage des planches

Des fissures longitudinales se produisent au cours du séchage des troncs d'arbres. Si la température est constante sur toute la longueur du tronc, ce sont les extrémités qui se fissurent en premier lieu, du fait que l'humidité de ces extrémités s'évapore rapidement. Pour réduire ces fissurations des extrémités, on recouvre celles-ci d'un mélange de chaux et de colle, ou avec de la résine.

c) Masse volumique du bois

La masse volumique du bois dépend de son humidité et de la porosité.

On rapporte généralement la masse volumique du bois à l'humidité normale de 15%, à l'aide de la formule suivante :

$$\gamma_0^{15} = \gamma_0^W [1 + 0{,}01 (1 - K_0) (15 - W)], \text{ en g/cm}^3, \qquad (42)$$

γ_0^{15} étant la masse volumique à une humidité de 15%, en g/cm³ ;

γ_0^W la masse volumique du bois à l'humidité[1] (W) à laquelle on fait la mesure, en g/cm³ ;

K_0 le coefficient de contraction ou retrait volumique ($K_0 = 0{,}6$ pour le bouleau, le hêtre et les bois feuillus, et $K_0 = 0{,}5$ pour les autres variétés);

W l'humidité du bois lors de la mesure.

La masse volumique est inférieure à l'unité pour la plupart des variétés de bois. Elle dépend de la compacité ou dureté et de l'humidité.

La masse volumique de la substance du bois est en moyenne de 1,55 g/cm³.

§ 4. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BOIS

La résistance mécanique du bois, par suite de l'hétérogénéité, c'est-à-dire de son anisotropie, varie avec le sens de l'effort mécanique appliqué. Il faut tenir compte de cette particularité lorsqu'on utilise le bois dans des charpentes.

a) Résistance à la compression

On distingue la compression dans le sens des fibres et en travers des fibres. Le bois travaille à la compression parallèlement aux fibres dans les pieux, les poteaux et les montants.

Lorsque le bois travaille à la compression en travers des fibres, on observe souvent des déformations importantes sans détériorations sensibles. C'est pourquoi on considère que la charge de destruction ou limite de résistance est celle qui correspond à la limite de proportionnalité, à partir de laquelle la déformation augmente plus vite que la contrainte. La résistance mécanique d'un bois diminue également quand la contrainte est appliquée sous un angle par rapport au sens des fibres.

La résistance à la compression, même quand la compression est appliquée dans un seul sens, varie fortement avec l'essence du bois, sa dureté et son humidité, les conditions de sa croissance, ainsi qu'en fonction de la nature des nœuds et des fissures.

La formule suivante permet de calculer à 1 kg/cm² près la résistance limite à la compression quand la contrainte est appliquée parallèlement aux fibres $\sigma^a_{c(W)}$, pour un échantillon de bois d'une humidité W% au moment de l'essai:

$$\sigma^a_{c(W)} = \frac{P_{max}}{ab}, \text{ en kg/cm}^2 \qquad (43)$$

P_{max} étant la charge maximale, en kg;

a et b les cotes de la section transversale de l'éprouvette, en cm.

L'éprouvette a la forme d'un prisme carré de 20 × 20 mm et d'une hauteur de 30 mm (parallèlement aux fibres).

La résistance à la compression qui résulte de l'essai d'une variété de bois donnée doit être transformée par la formule suivante, pour correspondre (à 5 kg/cm² près) à l'humidité normale de 15 %:

$$\sigma^a_{c(15)} = \sigma^a_{c(W)} [1 + \alpha (W - 15)], \qquad (44)$$

$\sigma^a_{c(15)}$ étant la résistance à la compression quand la contrainte est appliquée parallèlement aux fibres, à une humidité de 15% ;

α le coefficient de correction d'humidité. Ce coefficient indique la variation de la résistance limite à la compression (en %) pour une variation de 1% de l'humidité. Pour le bouleau, le pin, le cèdre, le mélèze, le hêtre et le frêne, on adopte $\alpha = 0,05$; pour le chêne et les autres variétés feuillues, sapin, épicéa, $\alpha = 0,04$.

La résistance à la compression parallèlement aux fibres des diverses essences de bois varie de 350 à 700 kg/cm². Pour le pin, elle est d'environ 400 kg/cm².

L'écrasement ou étranglement est une forme de compression perpendiculairement aux fibres que l'on rencontre parfois dans les constructions. Cette déformation peut provoquer des décollements entre les couches de bois à l'extrémité de la pièce, si cette extrémité est voisine de la zone où la pression est appliquée. On tient compte de cette circonstance de la façon suivante dans les normes concernant les charpentes en bois : les pièces ainsi comprimées doivent comporter à leurs extrémités une partie libre ayant une longueur suffisante. La longueur de cette partie ne doit pas être inférieure à l'épaisseur de la pièce, à la longueur de la zone d'étranglement, et en tout cas à 10 cm.

Le bois peut être essayé à la compression en travers des fibres, dans des plans radial ou tangentiel. A cet effet, on découpe une éprouvette en forme de prisme carré, de 20 × 20 mm de côté et de 30 mm de haut, de façon que les couches aux extrémités soient parallèles aux deux arêtes opposées du prisme et que les génératrices des couches annuelles soient parallèles à ses arêtes longues.

Les essais dans les sens radial et tangentiel doivent être faits sur des éprouvettes différentes.

On charge progressivement et uniformément l'éprouvette à une vitesse moyenne de 100 kg/mn (écart admissible ± 20%). Après chaque augmentation de 20 kg de la charge, on mesure la déformation de l'éprouvette à 0,005 mm près au moyen d'un comparateur. Les lectures au comparateur ne doivent pas interrompre la mise en charge. On arrête l'essai lorsque la déformation de l'éprouvette a nettement dépassé le point de limite de proportionnalité.

L'essai une fois terminé, on détermine l'humidité de l'éprouvette. Les charges et déformations sont inscrites dans le cahier d'essais.

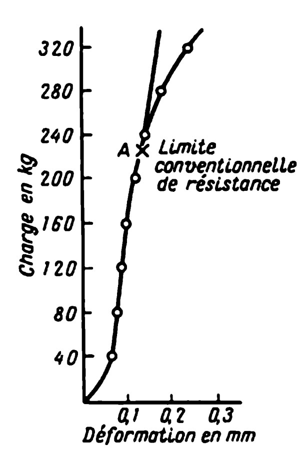


Fig. 116. Graphique de compression en travers des fibres

Se basant sur des lectures doubles de charges et de déformations, on trace le graphique de compression : on porte en abscisses les déformations et en ordonnées les charges (fig. 116). A l'aide de ce graphique, on détermine sur l'axe des ordonnées la limite conventionnelle de résistance à la compression à 5 kg près. Cette limite correspond au point où la courbe cesse d'être rectiligne pour devenir nettement curviligne.

On calcule la limite conventionnelle de résistance à la compression (pour une humidité W) par les formules suivantes, à 1 kg/cm² près :

$$\sigma_{c(W)}^{tang} = \frac{P^{tang}}{al} \text{ et } \sigma_{c(W)}^{rad} = \frac{P^{rad}}{al}, \qquad (45)$$

P^{tang} et P^{rad} étant respectivement les charges tangentielle et radiale correspondant à la limite conventionnelle de résistance, en kg ;

a la largeur de l'éprouvette, en cm ;

l la longueur de l'éprouvette, en cm.

On rapporte la limite conventionnelle de résistance à l'humidité de 15% à l'aide des formules indiquées plus haut à 1 kg/cm² près.

b) Résistance à la traction (à l'allongement)

On mesure la résistance du bois à la traction parallèlement aux fibres à l'aide d'éprouvettes spéciales préparées avec précision. L'éprouvette doit avoir la forme et les dimensions indiquées à la figure 117.

Sur chaque éprouvette, on mesure la largeur a et l'épaisseur b au milieu de la longueur active, c'est-à-dire au milieu de la longueur totale, ainsi qu'à une distance de

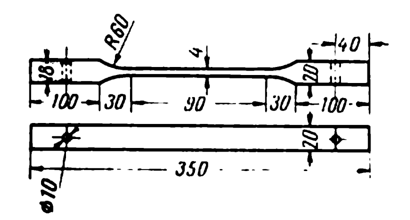


Fig. 117. Forme et dimensions d'une éprouvette pour mesure de la résistance limite à la traction parallèlement aux fibres

35 mm du milieu, près des têtes. Pour cela, on trace trois traits repères sur la surface de la partie active. Les valeurs a et b une fois obtenues, on évalue la moyenne arithmétique.

On charge uniformément et progressivement l'éprouvette à une vitesse moyenne de 1 500 kg/mn, sur toute la surface de l'éprouvette ; on peut admettre des écarts de ± 25%.

Un dynamomètre indique la charge maximale P_{max} à 5 kg près.

Dans les calculs, on ne tient pas compte des résultats des essais d'éprouvettes qui n'ont pas subi de détériorations ou ruptures dans la partie active.

Après chaque essai, on détermine l'humidité de l'éprouvette. Pour cela, on sépare par sectionnement la totalité de la partie active, c'est-à-dire de la partie centrale, et on la place immédiatement dans une boîte pour la détermination de l'humidité.

On calcule à 5 kg/cm² près la résistance (charge de rupture) correspondant à l'humidité à l'instant de l'essai

à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma^{a}_{r(W)} = \frac{P_{max}}{ab}, \tag{46}$$

P_{max} étant la charge maximale, en kg ;
a la largeur moyenne de la partie active de l'éprouvette, en cm;
b l'épaisseur moyenne de la partie active de l'éprouvette, en cm.

On peut, si nécessaire, rapporter la résistance des variétés feuillues à l'humidité normale de 15%, à 10 kg/cm² près, à l'aide de la formule indiquée plus haut.

On ne fait pas cette transformation pour les conifères, parce que l'humidité n'a qu'une influence insignifiante sur la résistance limite à la traction de ces variétés.

La résistance limite à la traction des éprouvettes varie de 800 à 1500 kg/cm², parallèlement aux fibres, et de 15 à 100 kg/cm² perpendiculairement aux fibres.

c) Résistance à la flexion statique

Le bois a une forte résistance à la flexion statique. Aussi, on l'utilise beaucoup dans les éléments travaillant à la flexion : poutres, planchers, échafaudages, etc.

Les éprouvettes pour essais à la flexion transversale statique sont des pièces équarries d'une section carrée de 20 × 20 mm et d'une longueur de 300 mm.

On calcule la résistance à la flexion σ^{tang}_{fW} la distance entre les deux forces appliquées étant 8 cm d'un échantillon d'humidité W (à l'instant de l'essai) par la formule suivante à 5 kg/cm² près :

$$\sigma^{tang}_{f(W)} = \frac{P_{max} l}{bh^2}, \tag{47}$$

P_{max} étant la charge de rupture, en kg ;
l la distance entre appuis, en cm ($l = 24$ cm);
b et h la largeur et la hauteur de la section de l'éprouvette, en cm.

On rapporte la résistance à la flexion à l'humidité normale de 15% par la formule de transformation suivante :

$$\sigma^{tang}_{f(15)} = \sigma^{tang}_{f(W)} [1 + \alpha (W - 15)], \text{ en kg/cm}^2. \tag{48}$$

On adopte $\alpha = 0{,}04$ pour toutes les variétés de bois.

La résistance à la flexion statique des éprouvettes des diverses variétés varie de 500 à 1 000 kg/cm²

Tableau 15

Caractéristiques physiques et mécaniques moyennes des bois d'essences principales (conifères et feuillues) de l'Union Soviétique

Essences	Proportion de bois tardif (%)	Masse volumique (g/cm3) à une humidité de 15%	Résistance en kg/cm² à une humidité de 15%				
			à la compression parallèle aux fibres	à la flexion statique	à la traction parallèle aux fibres	au cisaillement	
						dans le sens radial	dans le sens tangentiel
Bouleau	—	0,64	450	1000	—	85	110
Hêtre	—	0,65	460	940	1290	100	130
Chêne	66	0,72	520	940	1290	85	105
Epicéa	26	0,46	420	775	1220	50	50
Cèdre	23	0,44	350	645	780	55	60
Tilleul	—	0,51	390	680	1160	70	80
Mélèze	—	0,68	515	970	1290	115	125
Aune	—	0,52	370	690	—	—	—
Tremble	—	0,50	375	770	1310	60	80
Sapin de Sibérie	22	0,39	330	585	—	60	65
Sapin du Caucase	31	0,44	390	720	1120	75	80
Peuplier	—	0,47	350	600	1120	60	75
Pin	26	0,53	440	790	1150	70	75
Frêne	65	0,71	510	1150	1660	140	130

Il ne faut pas oublier que la résistance à la flexion statique des grandes pièces de construction est beaucoup plus faible que celle des éprouvettes standard utilisées dans les essais.

Le tableau 15 indique les caractéristiques physiques et mécaniques des conifères et des variétés feuillues.

§ 5. DÉFAUTS DU BOIS

On appelle défauts du bois les irrégularités de sa structure, les lésions possibles et, éventuellement, les diverses maladies. A l'inverse des autres matériaux de construction, on détermine la qualité d'un bois à la suite d'une évaluation scrupuleuse de ses défauts, et non d'après les caractéristiques numériques de la résistance d'une éprouvette.

Les défauts réduisent sensiblement les caractéristiques mécaniques du bois. Aussi les éprouvettes d'essais doivent être faites avec un bois sans défauts.

L'influence des défauts du bois sur ses qualités de construction dépend de la nature et de l'emplacement des défauts, de leurs dimensions, ainsi que de la nature et de la destination de la pièce considérée. Un même défaut peut être inadmissible dans certaines pièces, peut seulement réduire la qualité du bois d'autres pièces, et n'avoir parfois aucune importance du tout.

Le critère de qualité et de sorte des bois repose principalement sur les défauts considérés comme admissibles en fonction de leur usage. Chaque norme régissant une sorte de bois déterminée contient un tableau des défauts admissibles.

a) Fentes

Les fentes sont un défaut très fréquent des bois. Elles se forment non seulement au cours du séchage d'un bois abattu, mais aussi pendant sa croissance. Elles peuvent avoir plusieurs causes: contraction de séchage du cœur, ébranlements produits par le vent, fortes gelées.

D'après l'époque de l'apparition et la nature de la lésion dans le bois rond et le bois scié, on distingue les fentes du bois vivant (cadranure, roulures, fentes de gel) et les fissures du bois abattu, qui sont des fentes de séchage. Dans les petites pièces, les fentes, quelle que soit leur cause, sont considérées comme étant un défaut unique.

Les cadranures sont de larges fentes radiales qui pénètrent dans la partie centrale du tronc sans atteindre toutefois la périphérie. On distingue les cadranures *simples* et *en croix*.

Les cadranures simples sont constituées par une seule fente visible sur une section transversale, ou

bien par deux fentes situées sur un même diamètre (fig. 118). On appelle c a d r a n u r e e n c r o i x un ensemble de deux ou plusieurs fentes rayonnantes disposées sous un certain angle (fig. 119). On distingue les cadranures planes dans un même plan vertical et les cadranures hélicoïdales.

Les cadranures planes ne nuisent pas à la qualité des rondins qui doivent être sciés. Par contre, elles abaissent la

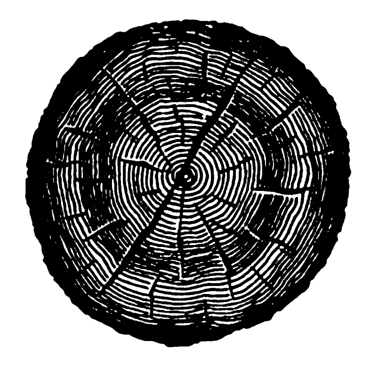


Fig. 118. Cadranure simple



Fig. 119. Cadranure en croix

qualité des autres rondins. Dans d'autres pièces (à l'exception des bois ronds et des grosses pièces de sciage), les cadranures peuvent abaisser la qualité, selon leur profondeur, leur longueur et leur disposition. Le séchage a pour effet d'accroître les dimensions des cadranures.

Les r o u l u r e s sont des fentes intérieures qui suivent une couche annuelle et qui s'étendent sur une certaine longueur axiale. Ce défaut est produit par la gelée.

On observe les roulures surtout dans l'extrémité voisine des racines d'un rondin où elles forment des fentes en forme d'arcs qui ne sont pas remplies par la sève ou par la résine (*roulures partielles*). Il existe également des *roulures circulaires* (fig. 120).

Les roulures, en enfreignant l'intégrité du bois, dégradent les planches et abaissent leur qualité.

Les f e n t e s d e g e l é e (g e l i v u r e s) sont des fentes longitudinales extérieures, larges sur le pourtour du tronc et se resserrant vers l'intérieur. Sur la surface d'un tronc d'arbre, ces fentes se présentent sous l'aspect de fentes ouvertes.

Les fentes de gelée se forment de la façon suivante (fig. 121): lors d'une forte baisse de température, les couches extérieures du tronc se refroidissent plus fortement et se contractent tandis que les couches intérieures ne subissent presque pas



Fig. 120. Roulure partielle (à gauche) et circulaire

ces modifications par suite de la faible conductivité thermique du bois.

Les fentes de gelée, en enfreignant l'intégrité du bois, déforment considérablement la forme du tronc. Elles réduisent donc la qualité du bois. En outre, elles concourent à la putréfaction.



Fig. 121. Fentes de gelée

Fentes de séchage (gerces). Ces fentes sont fréquentes dans toutes les variétés de bois. Elles se produisent lorsque le bois se dessèche au-dessous du point de saturation des fibres. Elles se propagent depuis la surface vers l'intérieur.

On distingue les variétés suivantes de fentes de séchage : 1) les fentes de tranches, qui ne se forment que sur les tranches, sans déboucher sur la surface latérale ; 2) les fentes de tranches unilatérales, qui se forment sur une tranche et débouchent sur une surface latérale ; 3) les fentes de tranches débouchantes, qui se forment sur une tranche et qui débouchent sur les deux surfaces latérales opposées.

En enfreignant l'intégrité du bois, les fentes peuvent fortement dégrader sa qualité. Leur influence sur la qualité

dépend de leurs dimensions et de leur disposition. Les plus nuisibles sont les fentes débouchantes, qui peuvent fendre complètement une pièce en deux.

b) Nœuds

Un nœud est constitué par la pousse d'une branche vivante ou morte (d'un arbre vivant) incorporée dans le bois du tronc. Les nœuds constituent le défaut le plus répandu du bois. Ils sont nuisibles parce qu'ils enfreignent l'homogénéité de la texture du bois: les fibres s'incurvent en



Fig. 122. Nœud de forme ovale

effet d'une façon particulière autour des nœuds, ce qui peut nuire à la résistance mécanique du bois, en particulier à la résistance à la traction. En outre, les nœuds réduisent la section active, ou section résistante, d'une planche ou d'un madrier, et rendent plus difficile le travail du bois.

L'importance de l'affaiblissement du bois par les nœuds dépend du nombre, des dimensions et de la disposition des nœuds. La résistance du bois peut être diminuée de plusieurs fois. Les nœuds sont particulièrement nuisibles dans les éléments travaillant à la traction (semelles tendues des fermes ; zones de traction des poutres).

Sur la surface du bois, les nœuds prennent des formes circulaires ou ovales. Ils sont entourés de leurs propres couches annuelles, concentriques et indépendantes de celles du tronc. On appelle ces nœuds nœuds *de formes ovales* (fig. 122). Dans les bois débités en pièces de diverses façons (sciés ou fendus) on rencontre des nœuds *de suture* ayant la forme de coins pénétrant dans l'intérieur et constitués par des couches indépendantes (fig. 123,*a*).

Dans les bois de sciage des variétés conifères, et en particulier dans le bois de pin, on rencontre des nœuds de suture symétriques, constitués par deux bandes allongées enclavées dans la région centrale du bois (fig. 123,*b*).



Fig. 123,*a*. Nœud de suture



Fig. 123,*b*. Nœuds de suture symétriques

On distingue les *nœuds débouchants*, c'est-à-dire ceux qui s'étendent d'une face à l'autre d'une pièce sciée, par exemple d'une planche, et les *nœuds non débouchants*, qui n'apparaissent que sur une face d'une planche ou pièce.

En ce qui concerne l'état du bois d'un nœud et le degré de développement du nœud sur le tronc, on distingue trois types fondamentaux de nœuds : les nœuds durs bien développés, les nœuds durs incomplètement développés, et les nœuds non développés.

Dans un nœud dur développé, les couches annuelles constituent un tout avec le bois environnant, sur

toute la périphérie du cercle. Parmi ces nœuds, on distingue les nœuds sains, les nœuds « cornés » et les nœuds colorés.

Un *nœud sain* ne présente aucun signe de putréfaction, sa couleur est identique à celle du bois environnant, mais elle peut être également un peu plus foncée parce que les couches du nœud sont plus serrées et que leur direction n'est pas la même que celle des couches annuelles du tronc lui-même.

Un *nœud « corné »* est constitué par du bois sain, mais abondamment imprégné de résine, de sève, ou de tannin. Il est habituellement plus foncé que le bois environnant et souvent plus dur.

Un *nœud coloré* est parfois entouré par du bois sain, alors que lui-même commence à se putréfier.

Un nœud incomplètement développé est un nœud mort, alors que l'arbre est vivant, et ensuite enrobé dans le bois. Les nœuds incomplètement développés n'apparaissant pas à la surface d'un rondin sont appelés incorporés

Un nœud dur non développé forme dans le bois des trous ou des caries. Parmi ces nœuds, on distingue trois variétés différentes : *faiblement encastrés*, *friables et de tabac.*

On ne rencontre les nœuds faiblement encastrés et non développés que dans les pièces sciées et dans le contre-plaqué. Le bois de ces nœuds est dur, mais il n'est pas aggloméré au bois environnant et peut facilement se détacher quand la pièce sèche.

Pour les charpentes porteuses en bois, on ne doit employer que des pièces à nœuds sains et développés. Pour chaque catégorie de pièces, le nombre et les dimensions des nœuds sont limités en fonction de leur disposition.

c) Pourriture du bois

La pourriture est une transformation biologique qui se manifeste par la décomposition du bois par des champignons qui s'y développent.

Les champignons provoquant la pourriture, dégagent des ferments particuliers qui transforment en glucose la cellulose — le principal composant du bois. La glucose est une substance facilement soluble dans l'eau qui alimente et favorise la croissance des champignons. Le

poids d'un bois attaqué par les champignons diminue. Ce bois se garnit de fentes transversales et longitudinales et finit par être détruit.

Les champignons se développent en présence de l'oxygène, nécessaire à leur respiration, mais ils ont également besoin d'eau et d'une température favorable. Un bois dont l'humidité est inférieure à 20% ne pourrit pas.

Le bois immergé dans l'eau, par exemple les pieux, peut également se conserver très longtemps, parce que l'absence d'oxygène empêche les champignons de se développer. Le bois ne pourrit pas en période de gelée, parce que les champignons ne peuvent se développer qu'à une température supérieure à 0 °C.

Certains champignons ne peuvent se développer que sur les arbres vivants ; d'autres ne peuvent se développer que sur le bois abattu ; d'autres enfin peuvent se développer dans les deux cas.

Sur un arbre vivant, la pourriture peut nuire à la qualité du bois jusqu'à lui faire perdre toute valeur technique, en fonction de son extension et du degré de son développement.

L'effet destructeur des champignons commence souvent sur la plante vivante et se poursuit sur le bois mort. Au fur et à mesure que les champignons se développent, la couleur du bois change. Ensuite, le bois devient friable, et des fentes y apparaissent. A l'intérieur de ces fentes se forment des cellules d'hyménium qui décomposent le bois. Le bois infesté par de tels champignons continue à se détériorer dans les charpentes, en particulier dans les régions les plus humides. Parmi les champignons qui détruisent le bois vivant, on peut citer les suivants : *moisissures blanche et brune du chêne*, *blanche des feuillus*, etc.

Les champignons qui croissent sur le bois abattu, le détruisent relativement lentement, en commençant par modifier sa couleur.

Les champignons qui croissent de préférence sur le bois abattu, dans les ouvrages et les constructions sont appelés des champignons des maisons. Ce sont les plus dangereux, car ils peuvent détruire complètement le bois en très peu de temps (en quelques mois).

Les champignons qu'on rencontre le plus souvent dans les pièces et matériaux de bois sont les suivants : le *véritable champignon des maisons*, qui est le plus dangereux, le

champignon blanc et le *champignon dit langue de bœuf.* Les autres champignons destructeurs du bois sont nombreux mais ils sont plus rares que les précédents.

Quand on sèche le bois, tous les champignons meurent et la pourriture s'arrête.

Les méthodes employées pour combattre la pourriture du bois sont décrites plus loin (p. 329).

d) Vermoulures

Les vermoulures sont des détériorations causées au bois par les insectes. Elles ont la forme de passages à section circulaire ou ovale, de profondeurs variées. On les rencontre dans toutes les variétés de bois. Elles réduisent plus ou moins la qualité du bois, en fonction de leur étendue.

Les insectes s'attaquent de préférence au bois fraîchement abattu ; mais ils attaquent également les bois sur pied desséchés et affaiblis. Dans certains cas, ils détériorent également les bois sains en cours de croissance. Ce sont principalement les scolytes, les cérambyx et quelques autres insectes qui détériorent fortement les arbres en cours de croissance.

Une vermoulure superficielle est provoquée par les hylésines, les scolytes et leurs larves. Les lésions ont la forme de sillons sinueux et peu profonds qui n'ont aucun effet nuisible sur la qualité de la matière après sciage, car le travail du bois fait disparaître les régions détériorées.

Si l'on utilise un bois attaqué par les scolytes en tant que rondins, ces derniers peuvent pourrir rapidement. Les insectes laissent souvent dans le bois des spores de champignons qui provoquent la putréfaction.

Un bois qui est attaqué par des vermoulures assez pénétrantes perd beaucoup de sa résistance mécanique, et de plus, résiste mal à la putréfaction. On ne doit donc pas employer de tels bois pour les charpentes porteuses.

Détériorations causées par les xylophages des maisons. Les scolytes et cancrelats attaquent également les pièces employées dans les constructions et les ouvrages divers. On rencontre surtout le xylophage des maisons de couleur brune qui a 4,5 à 5 mm de longueur. Il attaque les chevrons, les poutres des combles, les murs extérieurs, les appuis de fenêtres et les clôtures. La présence

de ces insectes est décelée par de nombreuses ouvertures circulaires qui laissent échapper une farine de bois de couleur jaune.

e) Déformations naturelles des troncs et de la structure du bois

Le défaut le plus fréquent du bois est constitué par des formes anormales du tronc de l'arbre. Mais les troncs d'arbres qui ont de tels défauts sont faciles à reconnaître et à écarter. Ces défauts n'ont donc pas une grande importance dans les bois de contsruction. Parmi eux, il faut signaler la courbure du tronc, l'évasement du pied, le resserrement du tronc.

La *courbure* du tronc consiste en ce que le tronc se trouve incurvé dans le sens de sa longueur. Cette courbure peut se prendre dans une seule ou plusieurs directions. Ce défaut réduit considérablement le rendement en pièces de sciage et peut être assez important pour obliger à transformer des pièces longues en bois de chauffage.

L'*évasement du pied* consiste en ce que la base du tronc est fortement élargie, comparativement au reste.

Le *resserrement* du tronc consiste en une forte diminution du diamètre du tronc (ou de la largeur d'une planche brute) sur toute la hauteur depuis la base jusqu'au sommet de l'arbre. Ce défaut donne des pièces sciées dans lesquelles les fibres sont souvent coupées, ce qui réduit la résistance mécanique du bois.

Les *saignées extérieures* sont des creux extérieurs longitudinaux qu'on observe dans la partie basse du tronc et qui sont dues aux excroissances des racines.

On observe ce défaut à l'extrémité inférieure des troncs bruts dont le pourtour est souvent ondulé au lieu d'être circulaire. On le constate aussi sur la surface latérale du tronc, sous la forme de creux longitudinaux. Il provoque une obliquité artificielle des couches dans les pièces sciées. Lorsque les creux longitudinaux sont longs et profonds, ils peuvent nuire à la qualité des rondins.

L'*obliquité des couches* consiste dans le fait que les fibres se développent hélicoïdalement relativement à l'axe du tronc.

A côté des couches obliques naturelles, on distingue également les couches obliques artificielles — inclinaison due à la section des fibres et des couches annuelles. L'obliquité naturelle ou artificielle des couches peut dégrader les caractéristiques mécaniques du bois en fonction du degré d'inclinaison des fibres et des couches annuelles.

L'obliquité des couches dans le bois se distingue par une augmentation de la contraction de séchage dans le sens des fibres, ce qui réduit considérablement la résistance du bois à la traction. En outre, la courbure longitudinale est également un des défauts d'un tel bois.

Le contournage des fibres est caractérisé par une disposition fortement fibreuse ou désordonnée des fibres du bois. Ce défaut peut prendre une forme ondulée « frisée » ou simplement désordonnée. Il peut se répandre dans toute l'étendue d'un tronc d'arbre ou seulement dans certaines régions. Le plus souvent, on l'observe à la partie inférieure du tronc, dans le voisinage du sol.

Le contournage des fibres réduit la résistance du bois à la flexion. Par contre, il augmente sa résistance au fendage. Les bois qui présentent ce défaut sont difficiles à travailler. La qualité des pièces sciées et des bois déroulés baisse pour cette raison. Par contre, ce défaut est mis à profit dans l'érable, le noyer, le frêne et le bouleau, quand on utilise ces variétés pour la fabrication des bois de marqueterie et pour certaines imitations.

Les « boucles » sont constituées par une courbure locale des couches annuelles, provoquée par la présence de nœuds ou de départs de branches. Aux coupes, la boucle présente des lignes concentriques, parfois coupées, courbées ou fermées, qui sont formées par la déformation des couches annuelles.

Dans les bois sciés, ce défaut peut être *unilatéral* ou bien *bilatéral*.

Les bouclages réduisent la résistance du bois soumis à une compression parallèle aux fibres, ainsi qu'aux flexions statique et dynamique.

La forme bilatérale et débouchante de ce défaut nuit davantage à la résistance mécanique du bois que la forme unilatérale et non débouchante.

§ 6. PRINCIPALES VARIÉTÉS DE BOIS EMPLOYÉES DANS LA CONSTRUCTION

Toutes les variétés, feuillues ou conifères, ne sont pas également employées dans les constructions. Les conifères ont l'avantage d'être largement répandus, d'avoir des troncs rectilignes et d'avoir un bois de meilleure qualité (plus résineux).

L'emploi des variétés feuillues s'étend actuellement. Les bâtisseurs s'efforcent d'employer le tremble, le bouleau, l'aune, le tilleul et le peuplier à raison d'au moins 10% de la consommation totale de bois. Ces variétés sont indiquées pour les constructions provisoires et secondaires, ainsi que pour les portes, chambranles, plinthes, parquets, cloisons, etc. Les variétés feuillues que nous venons de mentionner peuvent être employées pour les murs en rondins (à l'exception des premières rangées de sablières), pour les coffrages et les échafaudages.

a) Essences résineuses

Le p i n est un bois tendre, léger et solide. Ses hautes qualités en font un bois largement employé dans la construction.

Le pin qui pousse sur des terrains sableux et secs est appelé *pin rouge*. Il donne un bois de couleur jaune rougeâtre, extrêmement compact, très résineux, à couches annuelles serrées. Le pin qui pousse dans les dépressions argileuses est appelé *pin ordinaire*. Ses couches annuelles sont larges et son aubier est très développé. Ce bois est moins robuste que la variété précédente.

On utilise les rondins, madriers et planches en pin pour les murs des maisons, les ponts, les poteaux, les échafaudages, les coffrages, les étais des talus et des tranchées, les bâtis des fenêtres, les portes, les parquets, etc.

Le s a p i n. Le bois mûr de sapin est blanc, tendre, léger et moins résineux que celui du pin. Aussi, il pourrit plus rapidement. Le sapin est une des variétés d'arbres les plus répandues. On l'emploie beaucoup dans les constructions, mais il donne un bois de qualité inférieure à celui du pin.

Le m é l è z e a un bois plus lourd, plus dur et plus solide que le pin. Il résiste mieux à la putréfaction, et c'est

pourquoi, il est particulièrement précieux dans la construction des ponts et des ouvrages hydrotechniques.

Le bois de mélèze a l'inconvénient de se fendiller.

Le mélèze pousse en Sibérie, dans la région Nord-Est de la partie européenne de la Russie, en Extrême-Orient et à Kamtchatka. Parmi les autres essences résineuses, l'épicéa et le cèdre trouvent une large application.

b) Essences feuillues

Le chêne est une variété de bois extrêmement précieuse. Il est compact, robuste et souple. Il donne un aubier jaunâtre à rayons médullaires bien développés. Au séchage, le bois de chêne subit un retrait et tend à se fendiller, se conserve bien, aussi bien à l'air que dans l'eau.

On emploie le bois de chêne dans les charpentes importantes, en particulier dans les pièces sollicitées par des efforts dirigés en travers des fibres (semelles d'appui, tenons, languettes, fourrures). On emploie souvent le chêne pour les parquets, les pièces de menuiserie, les bâtis de fenêtres, les portes, les meubles, et pour fabriquer divers objets décoratifs.

Le bouleau est la variété feuillue la plus répandue en Union Soviétique. Son bois est dur et solide, mais le tronc est souvent courbé et résiste mal aux champignons destructeurs. Aussi, ce bois est relativement peu employé. (On l'emploie principalement pour les manches d'outils, les pièces tournées et dans la fabrication du contre-plaqué.)

Le *hêtre* a un bois de couleur blanc rougeâtre. Ce bois est dur, lourd et solide, mais il résiste très mal à la putréfaction, en particulier quand il se trouve en conditions d'humidité variables. Le bois de hêtre se dessèche et gauchit fortement. C'est pourquoi on l'emploie peu dans les constructions.

Parmi les autres feuillues, on emploie quelquefois le tremble (lattes des toitures), le tilleul et l'érable.

§ 7. STOCKAGE ET SÉCHAGE DU BOIS

On ne doit pas employer dans la construction un bois fraîchement débité, parce que son humidité excède considérablement l'humidité tolérée. Si le séchage est rapide et irrégulier, le bois peut gauchir et se fendiller. Aussi, le bois

doit sécher naturellement jusqu'au moment de son emploi. Le séchage protège d'autre part le bois contre les champignons.

L'aire de stockage doit se trouver sur une surélévation suffisante pour permettre l'écoulement des eaux. Les piles doivent être espacées de 4 à 5 m, et les rangées de piles disposées de manière que les vents prédominants puissent bien circuler entre elles. Sous chaque pile, on doit aménager une embase afin de laisser un certain espace libre entre le bois et le sol. Les piles doivent être recouvertes par une toiture temporaire avec auvent.

Dans ces conditions, le séchage du bois est naturel. La vitesse de séchage du bois dépend de la variété de bois et de l'épaisseur des pièces.

La durée nécessaire au séchage naturel dépend du climat et du temps. Il n'est pas exclu que le bois soit attaqué par les champignons en cours de séchage. C'est pourquoi on est passé au séchage artificiel du bois en chambres de séchage dans lesquelles l'agent thermique est surtout la vapeur d'eau.

Le séchoir (fig. 124,*a*) est doté de portes fermant hermétiquement et d'un équipement permettant de régler la température, l'humidité relative de l'air et d'évacuer l'humidité qui se dégage du bois. Les pièces de bois sont amenées dans le séchoir sur chariots. Le séchage doit être soigneusement organisé. La température ainsi que l'humidité relative doivent varier à l'intérieur du séchoir selon les différentes étapes de séchage. En outre, il faut prévoir une ventilation appropriée pour obtenir le régime de séchage requis. Si le régime est mal choisi, les pièces de bois peuvent se déformer, se fendiller fortement et avoir une humidité variable dans le sens de l'épaisseur et de la longueur. Si le régime est correctement choisi, le séchage artificiel donne de bons résultats et se déroule bien plus rapidement que le séchage naturel.

On sèche parfois le bois par des courants électriques de haute fréquence : sur la pièce qu'on veut sécher, on place 2 ou 4 électrodes grillagées (fig. 124,*b*), qu'on alimente à partir d'une génératrice. Le courant alternatif traversant le bois est transformé en énergie thermique uniformément distribuée sur toute l'épaisseur de la pièce. Cette énergie thermique sèche le bois. Le séchage du bois par courants de haute fréquence a de grands avantages sur les autres procédés, aussi bien en ce qui concerne les délais que la qualité

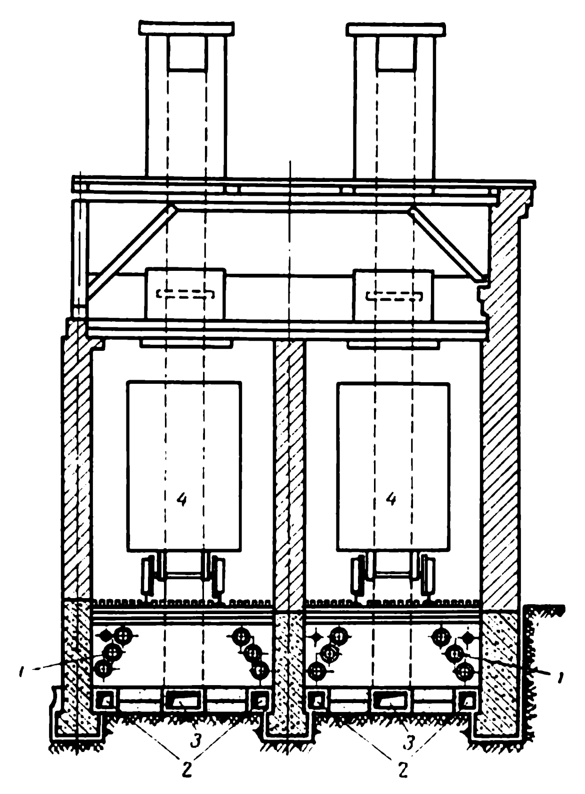


Fig. 124,*a*. Chambre de séchage du bois (coupe transversale de deux chambres) :

1 — calorifère ; *2* — conduits d'arrivée d'air froid; *3* — conduits d'évacuation d'air humide ; *4* — chariots chargés de bois

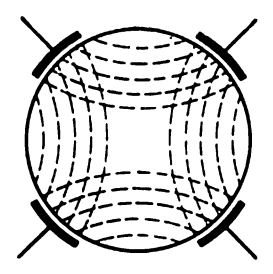


Fig. 124, *b*. Schéma de distribution des électrodes pour le séchage de rondins dans le champ des courants de haute fréquence

du produit obtenu (bois non fendillé, pas de gauchissement, etc.).

Le professeur A. Folomine a proposé de sécher le bois dans des bains remplis de pétrolatum réchauffé. Le pétrolatum est un hydrocarbure brun jaunâtre, ayant la consistance de la vaseline ; il est constitué par un mélange de paraffines et de cérésines avec une huile épurée et très visqueuse.

La pièce humide est plongée dans le bain où elle abandonne uniformément son humidité pendant que l'on réchauffe lentement le pétrolatum jusqu'à 80 °C. Ce procédé ne déforme par le bois et ne le fendille pas. Il faut 15 fois moins de temps pour sécher le bois par ce procédé qu'en séchoirs.

§ 8. DIVERSES CATÉGORIES DE BOIS

a) Bois ronds

Les bois ronds sont des tronçons d'un tronc d'arbre écorcés et débarrassés de leurs branches.

Parmi les divers bois ronds, on emploie dans la construction les *grumes de construction* et *de sciage*. On appelle ainsi des tronçons d'au moins 14 cm de diamètre à leur partie supérieure.

On classe les grumes de sciage et de construction des essences résineuses d'après leur longueur :

1) bois courts (de 2 à 3,5 m) servent à fabriquer des pièces et articles de construction ;

2) bois moyens de 4 à 7 m qui, une fois sciés, servent de planches et qui seulement équarris servent de poutres et de pièces analogues ;

3) bois de 7 à 9 m de long employés d'une pièce pour poteaux ou éléments sérieux des charpentes porteuses.

Les pièces de cette catégorie sont réparties en trois qualités. La première qualité comprend les bois de qualité supérieure, la deuxième qualité les bois présentant quelques défauts (mais sans pourriture), la troisième qualité les bois présentant des défauts de toute nature en nombre limité (mais sans pourriture).

On emploie les grumes de construction de première qualité pour des éléments sérieux des charpentes porteuses de grandes portées (arbalétriers, fermes). Les grumes de deuxième qualité constituent des pièces (poutres) porteuses de faible portée ; les grumes de troisième qualité servent de ron-

dins courants pour les murs des maisons en bois ou encore pour les étais des talus et des tranchées, etc.

Pour le stockage, les bois ronds sont empilés par essences, qualités et par longueurs.

b) Bois sciés

On obtient les bois sciés, par le sciage en long des *grumes de sciage*. Parmi les bois sciés des essences résineuses on distingue six qualités : la qualité supérieure et les qualités I, II, III, IV et V, en fonction de l'équarrissage et des vices.

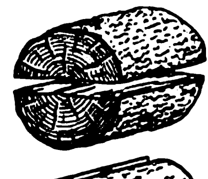




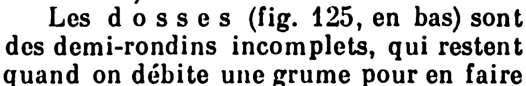


Fig. 125. Demi-rondin, quartier et dosse

Le simple débitage courant donne les demi-rondins, les quartiers et les dosses.

Les demi-rondins sont comme leur nom l'indique les deux moitiés d'un arbre scié suivant l'axe du tronc (fig. 125, en haut).

On obtient les quartiers en sciant longitudinalement un tronc suivant deux plans orthogonaux (fig. 125, au milieu).



Les dosses (fig. 125, en bas) sont des demi-rondins incomplets, qui restent quand on débite une grume pour en faire une pièce équarrie ou des planches. On les emploie comme panneaux de planchers et dans des constructions provisoires.

On classe les bois sciés en fonction de la nature de leur traitement et du rapport de la largeur à l'épaisseur. Les planches ont une largeur supérieure au double de l'épaisseur, tandis que les *bastings* ont une largeur inférieure au double de l'épaisseur.

On distingue les planches minces qui ont moins de 35 mm d'épaisseur et les planches épaisses, qui ont plus de 35 mm d'épaisseur.

D'après la nature du traitement des planches, on distingue les *planches* ou *lames nettes* ou *finies*, dans lesquelles les deux bords ont été sciés sur toute la longueur ou bien au moins sur la moitié de la longueur de chacun d'eux, et les planches *brutes ou non coupées*, dans lesquelles les bords ne sont pas sciés du tout, ou bien sciés sur moins de la moitié de la longueur.

Les *flancs* ou *faces* sont les deux larges faces d'une planche. Aussi bien, sur les pièces finies que sur les pièces brutes, les deux faces doivent être sciées sur toute la longueur.

Les grumes de sciage équarries sur les quatre faces donnent des *madriers* qui diffèrent des bastings par un équarrissage plus grand.

On obtient les bois sciés à partir du pin, de l'épicéa, du mélèze, du cèdre et du sapin.

On a normalisé les longueurs des planches et des madriers de 1 à 6,5 m de 0,25 m en 0,25 m. Pour la construction des ponts, leur longueur peut atteindre 9,5 m.

L'équarrissage des madriers varie de 110 × 110 à 220 × 260 mm. On les classe en quatre sortes ou qualités, d'après la qualité du bois et leur fini. En principe, les diverses qualités de madriers doivent satisfaire aux mêmes conditions que les planches, mais ces conditions sont moins sévères en ce qui concerne les défauts (l'épaisseur des planches étant plus faible, chaque défaut réduit davantage leur solidité). Par exemple, on tolère un plus grand nombre de défauts dits couches obliques (obliquité des couches) et de nœds dans les madriers que dans les planches.

c) Produits semi-finis et pièces terminées

On obtient les planches et les madriers rabotés à partir de bois d'essences résineuses et feuillues. On les classe en pièces simplement rabotées et en pièces rainurées, ces dernières portent une *rainure* sur un bord et une *languette* sur l'autre. La languette s'introduit dans la rainure de la pièce contiguë.

La rainure et la languette (fig. 126) peuvent avoir une forme rectangulaire (*a*), triangulaire (*b*), trapézoïdale (*c*) et en segment de cercle (*d*). On emploie les planches à rainure et languette pour les sols, les cloisons, et dans tous les cas où une liaison longitudinale étanche sur les bords des planches est nécessaire.

Pièces profilées. Ces pièces comprennent les *plinthes* qui servent à recouvrir l'angle entre le sol et le mur, les *mains courantes* des escaliers, et les *chambranles* des portes et des fenêtres. Les bâtis font également partie des pièces profilées.

Parquets. D'après la norme soviétique on distingue les catégories de parquets suivants : parquets en lames, mosaïques et parquets à rainures et languettes.

Les parquets en lames sont constitués par un support en lattes sur lequel sont collées les lames de parquet à rives droites.

Les lames de parquet portent sur leurs rives une rainure et une languette qui servent à les assembler entre elles.

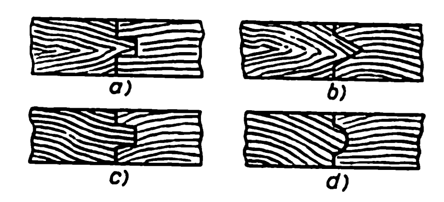


Fig. 126. Rainures et languettes de formes diverses

Quand les solives de support ont une largeur supérieure à 30 mm, les lames doivent comporter des gorges longitudinales. La forme et les dimensions des lames d'un parquet doivent être conformes à la figure 127,*a*. La fig. 127,*b* montre l'une des dispositions possibles des lames de parquet (type « hollandais »). Sur la figure 127,*a*, le dénominateur indique les dimensions des planches en pin et en mélèze. La forme et les dimensions d'un parquet en mosaïque doivent être conformes à la fig. 127,*c*. La forme et les dimensions des lames d'un parquet à rainures et languettes sont indiquées à la figure 127,*d*, la longueur L pouvant être 150, 200, 250, 300 et 400 mm, et la largeur B de 30 à 60 mm de 5 en 5 mm.

Un parquet mosaïque est constitué par des lames à rives droites, qui sont collées sur une feuille de papier que l'on enlève en même temps que la colle après avoir posé le parquet sur son support.

Un parquet traditionnel est constitué par des lames assemblées à rainures et languettes. Le standard d'Etat de l'U.R.S.S. fixe les tolérances de dimensions et de formes des lames que l'on emploie dans les divers parquets.

Les lames des parquets de toutes les catégories peuvent être en chêne, hêtre, pin, mélèze, frêne, érable, orme et en quelques autres variétés.

Les solives supportant les lames de parquet doivent être en pin, sapin, mélèze, cèdre, épicéa ou encore en bouleau, aune, tremble ou peuplier, mais après antiseptisation.

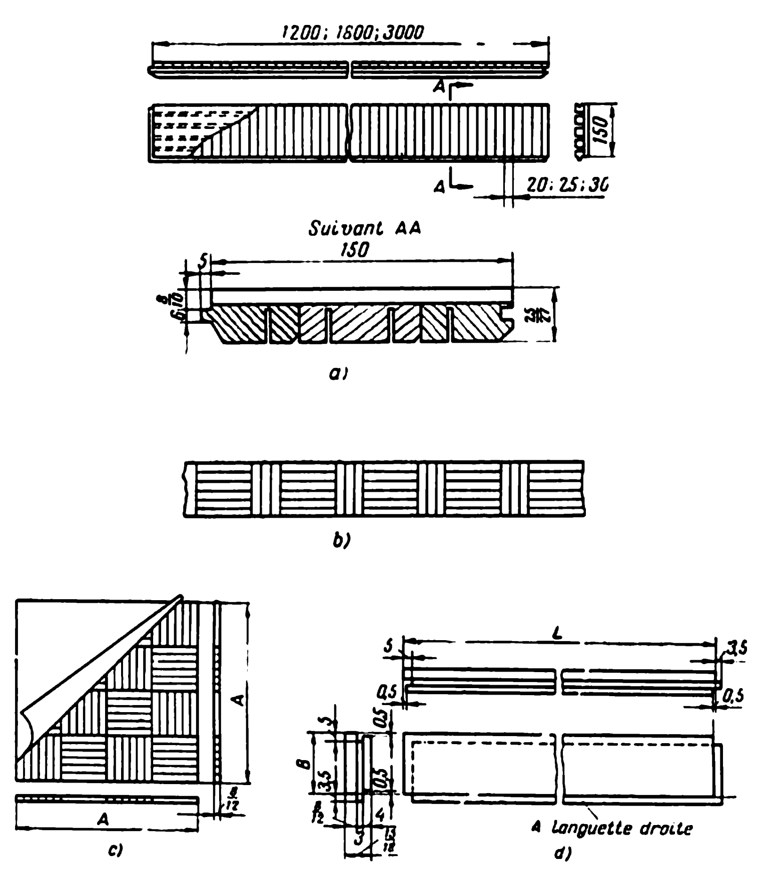


Fig. 12 Parquet en panneau

On ne peut pas utiliser tout bois pour les parquets.

L'humidité relative ne doit pas dépasser 8±2% pour les lames prêtes d'un parquet traditionnel ou d'un parquet mosaïque, ainsi que pour les solives de support des lames.

Les lames de parquet sont collées à leur support à l'aide de colles synthétiques qui résistent à l'eau, en particulier avec

des phénols-formaldéhydes type KБ-3 ou CП-2, des mélamines type MMФ, ou de la résorcine type ФP-12. Le joint collé doit être très compact. Sa résistance doit être au moins égale à 60 kg/cm² dans la direction parallèle aux fibres.

On peut tolérer des défauts dont la profondeur ne dépasse pas 0,3 mm sur les rives et faces des lames et 2 mm sur l'envers des rives et faces des lames de tous les genres de parquets. Les languettes d'un parquet traditionnel peuvent n'être rabotées que sur 50% de leur surface.

Les lames pour tous les genres de parquets ainsi que les éléments d'un parquet assemblé doivent avoir une forme géométrique régulière avec bords parfaitement parallèles et orthogonaux. Les surfaces de toutes les pièces doivent être lisses. Sur demande du client, la face extérieure des lames de parquet est vernissée.

Les lames de parquet (mosaïque ou traditionnel) sont emballées en paquets ne pesant pas plus de 40 kg. Toutes les pièces sont groupées par deux, face contre face. On groupe les pièces d'un même type, d'une même essence et de dimensions identiques. Chaque paquet de lames pour un parquet traditionnel doit contenir le même nombre de lames à languettes gauche et droite. Lorsqu'on emballe des lames de parquet vernissées, on doit intercaller entre les faces une feuille de papier ou toute autre matière douce. On peut emballer les lames dans des carcasses en bois ou dans des boîtes en carton.

Chaque paquet est ligaturé à l'aide d'un ruban ou d'un fil d'acier passé sur des lattes placées sur les faces latérales du paquet. Aucun clou ne doit être enfoncé dans les pièces emballées.

Les paquets de lames de parquet doivent être transportés dans des wagons, camions, etc., propres, secs et couverts. Ils doivent être bien protégés contre les coups, l'humidité, les rayons de soleil et les salissures de tous genres. On ne doit ni les charger, ni les décharger en vrac, c'est-à-dire en les lançant.

Les paquets de lames de parquet doivent être stockés en rangées régulières selon le type, les dimensions et l'essence de bois. Les paquets doivent être stockés dans des locaux secs d'un degré hydrométrique de l'air inférieur à 60%, à l'abri de l'humidité.

Le c o n t r e - p l a q u é est un panneau exécuté par collage de plusieurs feuilles de placage obtenues à partir de

billes de bois étuvées, traitées par des machines à décortiquer inventées en Russie en 1819. On fabrique le contre-plaqué avec les bois des essences feuillues et conifères.

Les feuilles de placage sont collées les unes aux autres à contre-fil.

On fabrique des panneaux de contre-plaqué de 2 à 15 mm d'épaisseur ; le nombre de placages varie de 3 à 13. La largeur des panneaux peut atteindre 2 m et leur longueur 3 m. Le contre-plaqué est collé avec différentes colles : de phénol-formaldéhyde, les colles à base de caséine et de ciment, etc. Le contre-plaqué est essentiellement utilisé pour le revêtement des murs. Pour les coffrages de bétonnage, on emploie un contre-plaqué résistant à l'eau, fabriqué avec une colle à base de bakélite. On distingue les variétés et les qualités de contre-plaqué d'après le bois employé, le nombre de couches et également d'après l'aspect.

Pièces fabriquées en usine. Les pièces et éléments en bois fabriqués en usine arrivent sur le chantier prêts à être employés. Sur le chantier, on n'effectue que l'assemblage.

La nomenclature des pièces et éléments en bois fabriqués en usine comprend :

solives avec tasseaux cloués :

solives collées et solives assemblées par plaques ;

panneaux cloués en demi-rondins pour couvertures et cloisons ;

menuiserie : blocs-fenêtres et portes, cloisons en bois et parquet en panneaux ; pièces équarries pour murs, éléments de toiture, panneaux de murs, etc.

Les *solives avec tasseaux* pour planchers et couvertures sont de deux types selon que les tasseaux sont cloués sur une seule face ou sur les deux (fig. 128).

Les solives ainsi que les tasseaux sont en bois résineux. Dimensions des solives : hauteur 200 à 240 mm ; largeur 80 à 120 mm ; longueur maximale 6,5 m. Equarrissage des tasseaux 40×50 mm.

Les *solives et panneaux collés* sont fabriqués en planches d'une épaisseur inférieure à 50 mm et d'une humidité inférieure à 15%. On emploie généralement des planches courtes et de qualité inférieure. On coupe les endroits détériorés et on assemble les parties restantes de ces planches par collage en longueur et en largeur avec une colle à base de polymères.

L'emploi de solives collées réduit la consommation en bois, permet d'éviter l'emploi de planches de grande longueur, et libère l'industrie de la préparation et du transport de ces planches.

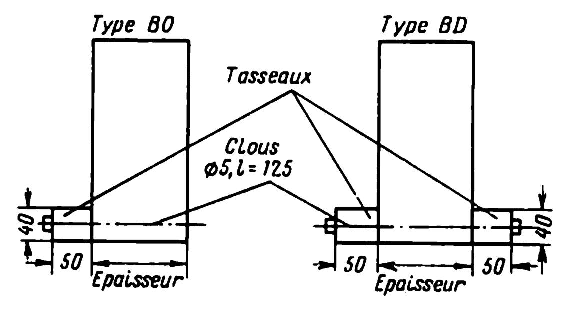


Fig. 128. Solive avec tasseaux

En raison de l'évolution des matières plastiques et des colles, l'emploi des pièces collées en bois s'est considérablement étendu.

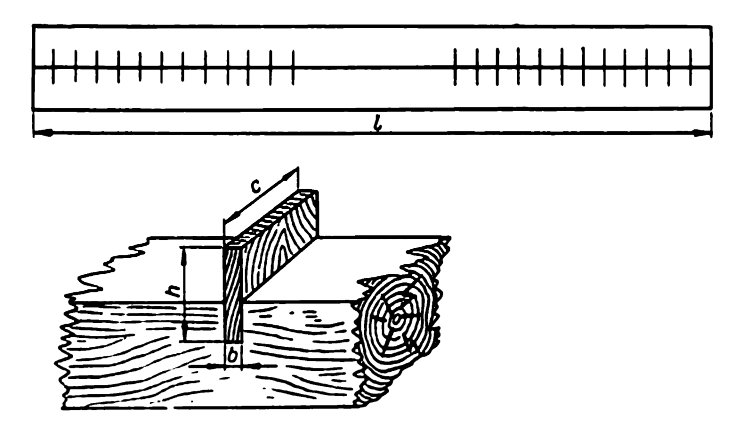


Fig. 129. Solive avec plaques d'assemblage

Les solives assemblées par plaques (fig. 129) sont constituées de deux ou trois madriers ou planches superposés et solidaires de plus de 100 mm de largeur. Les plaques d'assemblage sont en bois sec et dur : chêne,

hêtre, etc. Elles sont disposées perpendiculairement à l'axe de la solive composite, et travaillent au cisaillement, dans le sens perpendiculaire aux fibres.

Les panneaux cloués en demi-rondins pour couvertures et cloisons sont constitués par deux ou trois couches de planches. Les demi-rondins des panneaux sont maintenus avec des traverses ou une seconde couche de demi-rondins faisant saillie sur le panneau. Ceci permet de poser les extrémités de ces panneaux sur les tasseaux des solives des planchers ou couvertures. On fabrique ces panneaux avec des planches courtes et de qualité inférieure. Ils arrivent sur le chantier avec le lattis pour l'enduit déjà cloué. Dimensions des panneaux en demi-rondins pour planchers et couvertures : longueur 2000 mm, largeur 500 à 900 mm, épaisseur 40 à 50 mm ; pour les cloisons : longueur 2650 à 3450 mm, largeur 400 à 600 mm, épaisseur 50 à 80 mm.

Les *dalles en bois* sont des panneaux en bois, constitués par un noyau ou âme en lattis et une ou deux couches de placage collé sur les deux faces. On emploie des résineux ou des feuillus pour réaliser l'âme, et du pin, du bouleau ou de l'aune comme placage. La dalle en bois, sur une ou deux faces de laquelle est collé le placage en bois dur, est appelée dalle revêtue. Les dalles de bois sont très employées comme cloisons, portes et rangements dans les maisons standard.

Menuiserie. Les menuiseries sont employées surtout pour remplir les baies (portes et fenêtres). Un ensemble comprend le bâti, le battant de la porte ou bien la menuiserie de la fenêtre.

Pour le bâti, on emploie des pièces équarries et planches de résineux et de feuillus des deuxième et troisième qualités, de 60 mm d'épaisseur, 180 mm de largeur et 2,5 à 6,5 m de longueur. Pour les *battants des portes et la menuiserie de fenêtres*, on emploie des grumes sciées des mêmes dimensions, de première et de deuxième qualité.

Un *bloc-porte intérieur* comprend le bâti et la porte avec la quincaillerie.

Un *bloc-porte de balcon* comprend le bâti des deux portes (intérieure et extérieure), les deux battants de porte vitrés en place avec la quincaillerie, avec l'ébrasement et la plate-bande en bois. Le bâti est entouré de tôle et d'étoupe goudronnée et l'ensemble du bloc doit être peint à l'huile.

§ 9. PROTECTION DU BOIS CONTRE LA PUTRÉFACTION

La manière la plus efficace de protéger les pièces de bois contre la putréfaction consiste à sécher le bois préalablement jusqu'à une humidité inférieure à 20% (humidité minimale à laquelle les champignons destructeurs du bois ne se développent plus), et à le protéger ensuite contre l'humidité en prenant les dispositions constructives nécessaires.

Si le bois risque d'être rendu humide par des condensations de vapeur d'eau, il faut le protéger par une matière arrêtant la vapeur, par exemple du parchemin artificiel que l'on applique du côté de l'air le plus chaud et le plus humide. Dans les soubassements particulièrement humides, il faut une ventilation naturelle efficace, pour que l'humidité excédentaire soit évacuée par les passages d'air, aménagés dans les murs. On évite tout contact entre les éléments en bois et la pierre et autres matériaux conducteurs de la chaleur, avec une garniture en tôle ou en parchemin artificiel.

Si on ne peut pas empêcher le bois de s'humidifier de plus de 20% en cours de service, il faut le protéger spécialement à l'aide de matières antiseptiques. Par exemple, on doit toujours traiter par des antiseptiques les poteaux enfoncés dans le sol, les sommiers des murs en rondins et les parties des éléments en bois qui se trouvent dans des locaux humides (établissements de bains, buanderies) ainsi que les autres éléments en bois d'une humidité trop grande.

On appelle a n t i s e p t i q u e s des substances qui empoisonnent les champignons provoquant la putréfaction du bois. On peut diviser en deux groupes les antiseptiques employés, suivant qu'ils sont solubles ou insolubles dans l'eau.

Les antiseptiques qui doivent protéger le bois contre la putréfaction doivent avoir les propriétés suivantes :

toxicité élevée à l'égard des champignons destructeurs du bois ;

forte stabilité : ces substances doivent conserver pendant longtemps leurs propriétés toxiques, ne pas absorber l'eau et ne pas être entraînées par l'eau ; elles doivent être inoffensives pour l'homme et les animaux domestiques, pour le bois et les métaux (jonctions métalliques, clous) ;

ils doivent bien pénétrer dans le bois, ne pas avoir une odeur désagréable ; enfin, les antiseptiques ne doivent pas coûter cher.

Parmi les antiseptiques solubles, on emploie le fluorure de sodium, le silicofluorure de sodium, le dinitrophénolate de sodium, les résines phénoliques en phase vapeur, etc.

Le fluorure de sodium (NaF) est le produit le plus employé pour aseptiser les bois dans les constructions. Cette substance est une poudre blanche peu soluble dans l'eau. Elle est inodore et n'empêche pas de peindre ensuite le bois. On l'emploie en association avec d'autres antiseptiques pour recouvrir les éléments intérieurs qui ne sont pas exposés à l'action de l'eau courante. Le fluorure de sodium ne doit pas être employé en association avec la chaux, le ciment, la craie et le plâtre car, sous l'action de ces matériaux, il perd ses propriétés désinfectantes, et se transforme en fluorure de calcium, qui n'est pas soluble dans l'eau et n'est pas toxique à l'égard des champignons.

Le silicofluorure de sodium (Na_2SiF_6) est une poudre peu soluble dans l'eau. On l'emploie en mélange avec le fluorure de sodium, ou encore dans les pâtes de silicate, ou après un traitement à l'alcali. On ne l'emploie pas à l'état pur.

On prépare le dinitrophénolate de sodium en faisant agir du carbonate de sodium sur le dinitrophénol. La toxicité du dinitrophénolate de sodium est deux fois plus forte que celle du fluorure de sodium. Le dinitrophénolate de sodium n'est pas volatile, ni hygroscopique, et il n'attaque pas les métaux. On l'emploie en solution aqueuse pour imprégner les bois et pour traiter superficiellement les pièces en bois qui ne doivent pas être peintes.

Résine phénolique en phase vapeur. Ce produit, qui est un sous-produit de la production du phénol, est une masse visqueuse de couleur brun foncé. Mélangée à l'eau, elle forme une solution homogène qui donne au bois une couleur foncée. On emploie la solution de résine à une concentration de 15 à 20%.

Parmi les antiseptiques insolubles (huileux) les plus employés, on peut citer l'huile anthracénique et l'huile de schiste.

L'huile anthracénique est un liquide foncé qui a une forte action antiseptique, s'évapore lentement, est faiblement entraîné par l'eau et n'attaque ni le bois ni les métaux. Le composant actif est le phénol.

L'huile anthracénique a pour inconvénient son odeur très désagréable. En outre, son emploi ne permet pas de

peindre ensuite les éléments en bois, car cette huile donne au bois une couleur sombre. Aussi, l'huile anthracénique n'est-elle pas employée pour protéger les bois dans les locaux d'habitation et de service public. De plus, comme elle est combustible, on ne doit pas l'employer pour protéger les éléments qui se trouvent à proximité des cheminées et autre équipement chaud.

L'huile anthracénique est un produit de la décomposition du goudron de houille (voir le chapitre XI « Matériaux bitumineux »). Elle a besoin d'être réchauffée avant d'être employée.

L'huile de schiste est un liquide brun foncé qui a une forte odeur de phénol. On l'obtient par distillation des schistes combustibles. Cette huile est un peu moins toxique que l'huile anthracénique.

Pour rendre les bois aseptiques on emploie essentiellement à l'heure actuelle les procédés suivants : application d'une solution antiseptique sur la surface du bois ; chauffage suivi par une immersion dans l'antiseptique ; imprégnations alternatives dans une cuve chaude et une cuve froide ; imprégnation sous pression ; application de pâtes.

On applique la solution antiseptique sur la surface du bois en deux ou trois reprises, avec un pinceau ou au pistolet-pulvérisateur. L'inconvénient principal de ce procédé est la trop faible pénétration de l'antiseptique dans le bois. Cette méthode convient donc pour protéger des planches minces ou des bois humides (si l'on est en mesure de les sécher rapidement).

Les poteaux de bois humide sont traités par combustion suivie d'une imprégnation à l'huile anthracénique. L'extrémité du poteau qui est enfoncé dans le sol est calcinée à faible flamme. Après avoir carbonisé l'extrémité du poteau à une profondeur de 1 à 1,5 cm, on l'immerge pendant 3 à 4 heures dans une cuve remplie d'huile d'anthracène. Pour une meilleure pénétration de l'huile anthracénique, on laisse les poteaux sécher pendant 3 ou 4 jours. Ensuite, on couvre toute la surface carbonisée, en commençant par l'extrémité, de goudron de houille, une seule calcination de l'extrémité de la pièce ne suffisant pas à protéger le bois contre la putréfaction.

Imprégnation dans une cuve chaude et une cuve froide. Ce procédé consiste à immerger d'abord la pièce de bois dans une solution antisepti-

que chauffée à 90° et à la maintenir pendant 3 à 4 heures dans cette solution. Sous l'effet de l'échauffement du bois, l'air contenu dans les pores et les vaisseaux se dilate et s'échappe en partie. Ensuite, on fait passer le bois dans une cuve contenant une solution froide ou tiède d'antiseptique, qui est aspirée dans les cavités des cellules du bois se refroidissant.

L'imprégnation obtenue par ce procédé est plus efficace que celle obtenue avec une solution froide. On obtient les meilleurs résultats lorsque l'humidité du bois traité ne dépasse pas 30%. Si l'humidité est plus forte, il faut maintenir le bois plus longtemps dans la cuve chaude.

A. Folomine a proposé un autre procédé pour traiter à l'antiseptique les bois bruts dans une cuve d'huile, tout d'abord à haute température puis à basse température. On remplit la cuve chaude de pétrolatum à 80 °C (produit de réduction des huiles minérales par l'acide sulfurique). A cette température, l'eau s'évapore du bois d'une façon uniforme, ce qui permet à l'huile anthracénique chaude de l'autre cuve de mieux pénétrer dans le bois. La durée du séchage et de l'imprégnation des pièces par un antiseptique selon cette méthode est de 1 à 2 jours, suivant l'équarrissage des pièces traitées.

Imprégnation antiseptique sous pression. Ce traitement est compliqué et exige un équipement spécial d'usine. On commence par imprégner la matière par un antiseptique dans une autoclave sous une pression de 6 à 15 atm. Ensuite, on crée une certaine dépression dans l'appareil. Lorsque la surpression fait place au vide, l'air qui remplit les enceintes des cellules du bois expulse l'antiseptique en excédent. Ce dernier ne recouvre que la face intérieure des parois des cellules, ce qui réduit considérablement sa consommation. On traite par ce procédé d'imprégnation surtout les traverses, les pieux, les éléments des charpentes de ponts et des ouvrages hydrauliques.

Traitement antiseptique à l'aide de pâtes. On introduit le fluorure de sodium ou les autres antiseptiques du même genre dans une pâte que l'on applique sur la surface du bois humide ou mouillé (humidité relative non inférieure à 35 ou 40%). L'antiseptique se dissout dans l'eau et pénètre progressivement dans le bois. On applique la pâte avec un pinceau ou avec un pistolet pneumatique.

On distingue les pâtes suivantes : pâtes dites « extraits », pâtes bitumineuses, silicatées et argileuses. Les pâtes de

marques 100 ou 200 contiennent respectivement au moins 100 ou 200 g d'antiseptique par m² de surface de bois traité. On doit utiliser les premières pour aseptiser les pièces minces, et les dernières pour aseptiser les pièces massives.

§ 10. PROTECTION DU BOIS CONTRE L'INFLAMMATION

L'inflammabilité est l'un des inconvénients essentiels du bois. On adopte les dispositions suivantes pour protéger le bois contre l'inflammation :

1) dispositions constructives — on éloigne les pièces en bois des sources de chauffage ; à des intervalles appropriés, on construit des murs incombustibles (murs pare-feu) et des cloisons résistant au feu ;

2) on recouvre les pièces en bois d'un enduit ou de matières incombustibles et calorifuges, par exemple, de plaques en amiante-ciment;

3) on peint le bois à l'aide de matières fluides incombustibles qui forment sur le bois une pellicule dont l'épaisseur peut atteindre 1 mm ;

4) on applique sur la surface du bois une composition spéciale fluide d'une consistance épaisse qui forme une croûte dont l'épaisseur peut atteindre 3 mm ;

5) on imprègne les pièces de bois de compositions ignifuges — les *antipyrènes*.

Les *peintures ignifuges* sont composées par une matière de charge et un liant. Dans les peintures silicatées, la matière de charge est un sable de quartz finement broyé, ou bien du spath lourd, de la craie, de la magnésite. Le liant est constitué par du verre soluble. Pour donner à la peinture la couleur désirée, on ajoute des pigments bon marché : rouge de Prusse, ocre ou minium de fer.

Outre les compositions à base de verre liquide, on utilise également les peintures ignifuges suivantes : peintures à la caséine, qui ne résistent pas à l'eau, peintures à l'huile avec addition de substances ignifuges et peintures au chlorure de vinyle. Les deux dernières catégories résistent à l'eau. La consommation en peinture ignifuge varie de 0,5 à 0,7 kg/m² de la surface peinte.

On applique les *badigeons ignifuges* sur la surface avec un pinceau, à deux reprises successives. La consommation est d'environ 1 à 1,2 kg/m² de surface enduite.

Les badigeons agissent de la façon suivante : au réchauffage, les composants de la matière se ramollisent et forment une pellicule d'aspect vitreux. Cette pellicule cimente le charbon de bois qui se forme à la surface. Ce charbon de bois, qui est mauvais conducteur de chaleur, protège les couches intérieures de bois contre la chaleur.

La protection réalisée par un badigeonnage est due à l'épaisseur et à la capacité calorifique de la couche de revêtement. Cette couche empêche le bois de se chauffer, et s'oppose donc à la gazéification nécessaire à la combustion.

On prépare les badigeons sur place. On les emploie pour protéger contre le feu les éléments de bois difficilement accessibles des bâtiments et ouvrages (pannes, chevrons, etc., à l'abri de l'eau).

On emploie souvent un badigeon constitué par un mélange de 25% en poids de superphosphate, de 15% de bouillie de sulfite, de 25% d'argile et de 35% d'eau contenant un pigment.

Les badigeons à base d'argile, de chaux, de plâtre, etc., sont les plus simples et les plus faciles à se procurer.

L'adhérence des badigeons au bois est faible ; aussi, ils se détériorent relativement vite, ce qui oblige à les remettre en état périodiquement.

Imprégnation du bois par des substances ignifuges. On emploie surtout les ignifuges suivants : le biphosphate d'ammonium ou ammophos, poudre blanche cristalline contenant du phosphate d'ammonium simple et double, et du sulfate d'ammonium. Cette substance se dissout bien dans l'eau et n'est pas volatile.

On peut traiter les bois par les procédés suivants : application au pinceau d'une solution aqueuse du produit ignifuge, imprégnation dans une solution sous pression et à température normales, ou encore imprégnations alternatives dans une cuve chaude et une cuve froide, et enfin imprégnation sous pression.

On emploie le premier procédé pour traiter les charpentes déjà construites, et qui ne peuvent pas être imprégnées. Le deuxième sert à traiter les pièces qui ne sont pas très épaisses (traitement de 2 à 5 jours). Le troisième et surtout le quatrième sont employés en usine. L'imprégnation sous pression utilise un ignifuge cristallisé, à raison de jusqu'à 100 kg par m^3 de bois traité.

CHAPITRE XI

LIANTS BITUMINEUX ET MATÉRIAUX DÉRIVÉS

§ 1. NOMENCLATURE ET CLASSIFICATION

Las matériaux de construction bitumineux sont ceux qui contiennent des liants bitumineux. On divise ceux-ci en bitumes et en goudrons.

Les matériaux bitumineux sont des mélanges complexes de carbures et de leurs dérivés minéraux (combinaisons de carbures et de soufre, d'oxygène, d'azote). Les bitumes sont solubles dans la sulfure de carbone, le chloroforme, le benzol et d'autres dissolvants organiques. On distingue les catégories suivantes de matériaux bitumineux : bitumes naturels, roches asphaltiques et bitumes pétroliers.

Les bitumes naturels sont des substances solides ou bien des liquides très visqueux que l'on trouve dans la nature à l'état pur ou bien dans des roches imprégnées par ces matières.

Les roches asphaltiques sont des roches imprégnées par du bitume naturel : grès bitumineux, calcaires bitumineux. On extrait des roches asphaltiques le bitume naturel pur, ou bien on utilise ces roches sous forme broyée comme poudre d'asphalte.

Les bitumes de pétrole sont des substances solides ou semi-liquides (à température ordinaire) que l'on extrait des pétroles naturels.

Le groupe des goudrons comprend les goudrons bruts, les huiles de goudron et la poix.

Goudrons bruts. Ce sont des produits liquides provenant de la décomposition des matières organiques (houille, lignite, bois, tourbe, etc.) à une haute température et en l'absence de l'air. Une telle décomposition peut avoir pour but la production de coke ou de gaz combustibles artificiels.

Les huiles de goudron. Les huiles de goudron sont des produits que l'on obtient par la distillation des goudrons.

Poix. Résidus solides provenant de la distillation des goudrons.

Parmi les matériaux précités, les bitumes pétroliers, les goudrons de houille et la poix sont ceux que l'on utilise le plus dans la construction et dans la fabrication des matériaux de construction. Ces matières ont des propriétés communes, qui ont permis de les classer dans le groupe des matières bitumineuses et qui ont défini leurs applications.

Les matières bitumineuses sont des mélanges complexes de divers carbures et de leurs dérivés. Le chauffage les ramollit, mais elles redeviennent visqueuses ou même solides en se refroidissant. Elles possèdent les propriétés des liants. Elles sont presque insolubles dans l'eau et sont légèrement solubles dans les dissolvants organiques. Leur couleur est noire ou brun foncé ; c'est pourquoi on les appelle parfois les liants noirs. Elles vieillissent sous l'action des agents atmosphériques (humidité, oxygène de l'air, lumière) ou encore lorsqu'on les chauffe. Les goudrons et la poix se modifient le plus fortement, les bitumes de pétrole et bitumes naturels moins (c'est pourquoi les matériaux de construction bitumineux durent plus longtemps que ceux à base de goudron).

Les propriétés suivantes des bitumes, des goudrons et de la poix sont les plus précieuses dans les travaux de construction et la fabrication des matériaux de construction : imperméabilité à l'eau, résistance aux acides, aux bases et aux liquides et gaz agressifs, adhérence énergique au bois, aux pierres et aux métaux, augmentation rapide de la viscosité par refroidissement et une bonne plasticité aux températures positives.

On fabrique les matériaux suivants à l'aide des liants bitumineux :

mortiers et bétons d'asphalte et de goudron employés pour les revêtements des routes, des trottoires, des sols et comme étanchéité ;

matériaux bitumineux et matériaux goudronneux pour couvertures et étanchéités ;

compositions pour adhérence et embellissement (employées pour coller et colorer les matériaux bitumineux en rouleaux (c'est-à-dire en feuilles) servant de couvertures et d'étanchéités) ;

vernis au bitume et au goudron, employés comme compositions anticorrosives (par exemple, pour la protection des tuyaux).

§ 2. BITUMES DE PÉTROLE

D'après le procédé de fabrication, on classe les bitumes de pétrole en bitumes résiduaires, en bitumes oxydés et en bitumes cracking.

Les bitumes résiduaires sont produits dans des fours tubulaires à dépression et à fonctionnement continu, après que l'essence, le pétrole et une partie des huiles sont séparés du pétrole brut par distillation. Ce sont des substances noires qui, à température ordinaire, sont solides ou presque.

Les bitumes oxydés, ou bitumes aérés, sont obtenus en soufflant l'air à travers les résidus de pétrole brut. L'oxygène de l'air oxyde alors les résidus pétroliers et les rend plus compacts.

Les bitumes cracking sont des résidus que l'on obtient au cracking du pétrole brut et des huiles de pétrole à haute température en vue d'accroître le rendement en essence.

En soufflant l'air à travers ces résidus, on obtient des bitumes cracking et oxydés.

Les bitumes de pétrole sont versés à l'état chaud dans des récipients en acier ou en bois. Après refroidissement on les envoie aux utilisateurs. Le bitume, en grande quantité, est expédié aux chantiers à l'état chaud dans des wagons-citernes calorifugés ou dans des réservoirs réchauffés à la vapeur, passant dans une chemise. Le bitume solide est expédié sur wagons en vrac, c'est-à-dire sans aucun emballage, ou bien dans un emballage en papier.

On définit la classe ou qualité d'un bitume pétrolier d'après la profondeur de pénétration de l'aiguille d'un instrument normalisé appelé pénétromètre (fig. 130). On mesure la pénétration dans le bitume sous une charge de 100 g appliquée pendant 5 s à la température de 25 °C.

Pour essayer un bitume fondu, on le verse dans une coupe en cuivre pour former une couche de 30 mm d'épaisseur. Après refroidissement et séjour dans de l'eau à 25 °C, on place cette coupe sur le platine *1* de l'instrument, et on amène l'extrémité de l'aiguille *2* en contact avec la surface du bitume. L'aiguille une fois bloquée avec le bouton *3*, on note la position de l'aiguille sur le cadran gradué *4*. Ensuite, en appuyant sur le bouton *3*, on laisse l'aiguille s'enfoncer par gravitation dans le bitume pendant 5 s. A la fin de cette période, on bloque de nouveau l'aiguille et on procède à une seconde lecture du cadran gradué *4*. La différence entre

les deux lectures donne la profondeur de pénétration, exprimée en degrés. Un degré du pénétromètre équivaut à 0,1 mm. Ainsi, si la profondeur de pénétration est de 140 °C, cela indique que l'aiguille du pénétromètre s'est enfoncée de 14 mm dans la matière. La profondeur lue est d'autant plus faible que le bitume est plus dur.

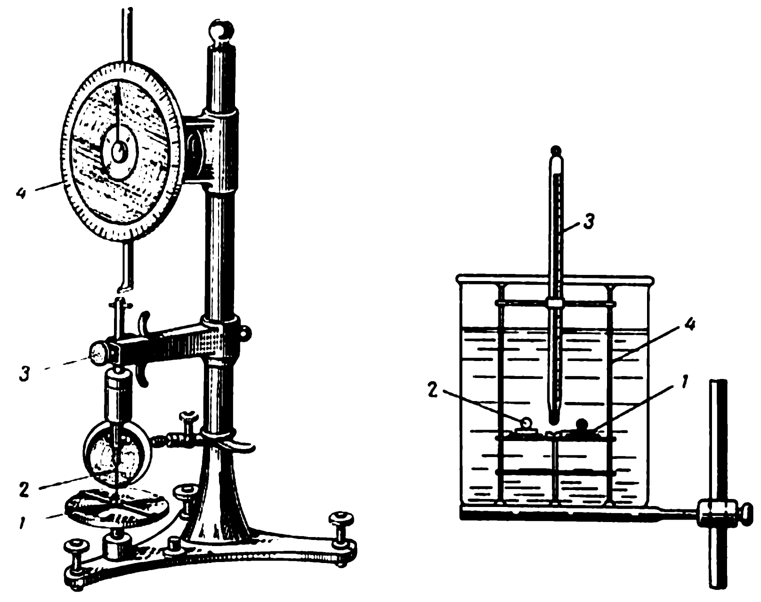


Fig. 130. Pénétromètre

Fig. 131. Appareil « à bague et bille »

On détermine la température de ramollissement d'un bitume avec un appareil appelé appareil « à bague et bille » (fig. 131).

Cette température est évaluée de la façon suivante. On verse le bitume chaud à l'intérieur de la bague *1*. Après refroidissement, on enlève l'excédent de bitume au ras de la surface de la bague avec une lame de couteau chaude. On pose ensuite la bille en acier *2* sur la surface du bitume complètement refroidi.

On fixe généralement trois bagues avec billes sur le support *4* dans des trous spécialement prévus à cet effet. Le support avec bagues, billes et thermomètre *3* est immergé

dans une cuve contenant de l'eau à 5 °C et y est maintenu durant 15 mn. Ensuite, on place la cuve d'eau sur une grille d'amiante et l'on chauffe jusqu'à ce que la température de l'eau s'élève de 5 °C en 1 mn.

Le bitume commence à se ramollir, et les billes s'y enfoncent progressivement jusqu'à toucher le plateau

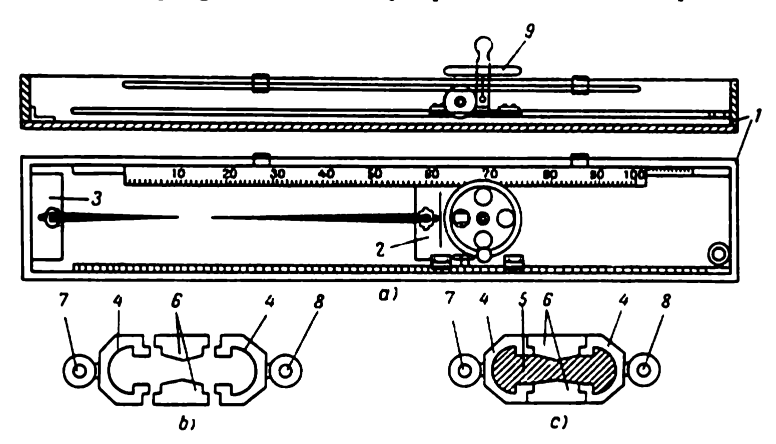


Fig. 132. Ductilomètre et moule servant à préparer les éprouvettes

inférieur du support. On adopte comme température de ramollissement la température de l'eau à cet instant.

Les bagues et les billes ont des dimensions rigoureusement normalisées, et les indications de cet appareil ne peuvent être considérées comme correctes que si ces dimensions sont rigoureusement respectées.

On détermine la ductilité du bitume sur un appareil appelé ductilomètre (fig. 132,*a*). Cet appareil est constitué par un caisson en bois étanche à l'eau *1*, d'une longueur de plus de 100 cm, et le long duquel des chariots mobiles *2* peuvent être déplacés électriquement ou à la main à une vitesse de 5 cm/mn. En plus des chariots mobiles, on prévoit également un amarrage fixe *3*. Les éprouvettes de bitume ont la forme d'un 8 dont les dimensions et la forme sont normalisées.

Le moule en laiton qui sert à préparer l'éprouvette (démontée sur la fig. 132,*b*, et assemblée sur la fig. 132,*c*) est constitué par les pièces *4* et *6*. On verse le bitume fondu *5* dans ce moule. Après refroidissement de l'éprouvette, on

Tableau 16

Caractéristiques physiques et chimiques des bitumes de pétrole

Indices	Normes et marques		
	БН-IV	БН-V	БН-VK
Pénétration de l'aiguille à 25° (mm)	21-40	5-20	au moins 20
Ductilité minimale à 25° (cm), au moins	3	1	non définie par les normes
Température de ramollissement en degrés, au moins	70	90	90
Solubilité dans le chloroforme ou le benzol (%), au moins	99	99	99
Perte de poids maxi au bout de 5 h à 160° C (%)	1,0	1,0	1,0
Pénétration de l'aiguille dans le résidu après mesure de la perte de poids, en %, de la pénétration initiale, au moins	60	60	60
Température d'inflammation en degrés, au moins	230	230	230

Observations. Ces bitumes ne doivent contenir ni acides, ni bases solubles dans l'eau et ne doivent pas contenir plus de 0,3% d'autres combinaisons solubles dans l'eau.
Ils ne doivent pas non plus contenir d'eau.

enlève les parois latérales *6*, et on place l'éprouvette dans l'appareil d'essai, en fixant le moule à l'amarrage fixe par une boucle *7*, et au chariot mobile par l'autre boucle *8*. Des goupilles servent à bloquer les boucles du moule sur les deux chariots.

On remplit d'eau le caisson du ductilomètre, de façon que l'eau recouvre le moule et le bitume. On maintient la température de l'eau à 25 °C, en faisant l'appoint en eau tiède.

Au bout d'une heure, le bitume de l'éprouvette acquiert cette température de 25 °C. On commence alors à l'étirer

en déplaçant le chariot mobile vers la droite à l'aide du volant *9*. L'éprouvette de bitume commence à s'étirer et à s'amincir en un fil fin, qui finit par se rompre. On lit sur une règle graduée la longueur du fil au moment de la rupture. Cette longueur, exprimée en cm, exprime la ductilité du bitume.

Suivant le standard de l'U.R.S.S., les bitumes de pétrole des marques ou qualités БН-IV, БН-V et БН-VК, employés pour les couvertures et autres travaux, doivent posséder les caractéristiques physiques et chimiques indiquées au tableau 16.

Trois des caractéristiques physiques principales des bitumes : la température de ramollissement, la pénétration et la ductilité sont interdépendantes.

Les bitumes durs dans lesquels l'aiguille ne pénètre que peu ont une température de ramollissement élevée et une faible ductilité, et par suite sont fragiles, alors que les bitumes à faible température de ramollissement sont très ductiles. Dans les travaux de construction, on doit employer les bitumes dont les propriétés sont conformes à leurs conditions de service dans les éléments de la structure.

§ 3. BITUMES NATURELS

Le bitume naturel est relativement rare à l'état pur.

On rencontre bien plus souvent les bitumes naturels imprégnant des roches (calcaires et grès).

Le bitume naturel s'est formé dans les couches supérieures de l'écorce terrestre, à partir du pétrole naturel, à la suite de l'élimination extrêmement lente des fractions légères et moyennes, mais aussi à la suite de certains phénomènes d'oxydation et de polymérisation. Le pétrole naturel est passé dans les couches supérieures de l'écorce terrestre par des phénomènes de migration.

On appelle migrations les déplacements des pétroles naturels à l'intérieur de l'écorce terrestre. Dans ces migrations, le pétrole imprègne certaines roches poreuses et comble leurs vides. Ces phénomènes ont duré de nombreux millénaires et ont été provoqués principalement par la chaleur et par de fortes pressions.

De même que les bitumes de pétrole, les bitumes naturels sont une substance organique noire ou brun foncé, presque inodore et extrêmement plastique à l'état chaud. Le bitume

se ramollit progressivement et devient liquide quand on le chauffe, puis durcit de nouveau quand il refroidit. Le bitume naturel n'est pas soluble dans l'eau, mais il est facilement soluble dans le sulfure de carbone, le chloroforme, la térébenthine, le benzol, et plus difficilement dans l'essence.

On peut extraire les bitumes naturels des roches bitumineuses, par cuisson dans des chaudières remplies d'eau, ou bien par dissolution dans des matières organiques (extraction).

Le bitume n'est généralement pas extrait par de tels procédés des calcaires bitumineux car cela coûterait trop cher. On broie finement ces roches dans des broyeurs à boulets pour obtenir une poudre d'asphalte. Cette poudre constitue l'agrégat le plus fin dans les bétons d'asphalte et mortiers d'asphalte. Mais on l'emploie principalement pour obtenir des mastics d'asphalte.

On utilise le mastic d'asphalte pour préparer le béton asphaltique. On prépare ce mastic en mélangeant la poudre d'asphalte avec un bitume de pétrole dans des chaudières. On prépare également le béton asphaltique sans mastic d'asphalte, en mélangeant un bitume de pétrole avec des agrégats minéraux.

Les bitumes naturels sont peu employés dans la construction par suite de leur prix de revient élevé.

§ 4. GOUDRONS ET POIX

Nous avons déjà dit que les goudrons résultent de la condensation de matières gazeuses produites par la décomposition de certaines substances organiques à haute température, sans accès d'air. Ce phénomène est appelé la distillation sèche et destructive ; il est accompagné par une modification complète de la structure chimique de la substance distillée.

Les goudrons de houille sont le plus souvent le résultat de la cokéfaction et la gazéification de la houille. Les produits de transformation de ces goudrons sont très employés dans la fabrication des matériaux de construction, les goudrons de houille ayant de meilleures propriétés que les autres goudrons (de bois ou de tourbe) au point de vue des travaux de construction.

Le goudron de houille à l'état brut est un liquide noir huileux dont la composition est extrêmement complexe et

dont le poids spécifique atteint ou même dépasse 1,12. Il a une odeur pénétrante très caractéristique qui tient à la présence de combinaisons du genre des phénols, crésols et de la naphtaline. Le goudron brut n'est pas employé directement dans la fabrication des matériaux de construction. Les composants volatils qu'il contient s'évaporent même à une température modérément élevée (par exemple sous l'action des rayons solaires). Cela modifierait donc les propriétés initiales des matériaux de construction (apparition de fragilité, fissuration). Par distillation, on élimine l'eau, toutes les huiles légères et une partie des huiles moyennement lourdes, et l'on obtient ainsi le *goudron distillé*.

Les points d'ébullition des divers composants du goudron sont différents. L'huile légère se sépare au-dessous de 170 °C, l'huile moyenne entre 170 et 270 °C, l'huile lourde entre 270 et 300 °C, et l'huile anthracénique entre 300 et 360 °C. Quand la distillation est terminée, et que toutes les huiles sont éliminées, on obtient après refroidissement une matière noire et dure que l'on appelle la *poix*. On mélange souvent la poix avec l'huile anthracénique qui est peu volatile, ou avec du goudron distillé. On obtient ainsi le *goudron complexe* ou composite, le plus employé dans les travaux de construction.

L'huile anthracénique est une masse fluide jaune verdâtre, de la consistance du beurre. Elle a une odeur caractéristique du fait qu'elle contient des phénols et des combinaisons sulfurées. Elle contient parfois des résidus, par exemple l'anthracène incomplètement éliminé dans les usines de distillation.

On emploie le goudron de houille et ses dérivés (huile anthracénique, poix) pour fabriquer les bétons de goudron, ou encore dans la construction des routes et dans la fabrication des matériaux de couverture à base de goudron.

La poix obtenue à partir de la houille est une substance amorphe noire, solide à la température ordinaire, d'une densité de 1,25 à 1,28.

La poix contient des carbures d'hydrogène à poids moléculaire élevé et des dérivés de ces carbures. Elle contient également du carbone libre, c'est-à-dire de fines particules de carbone non combinées. La poix existe dans les goudrons, mais en quantité très faible.

On produit diverses qualités de poix que l'on distingue par leur température de ramollissement. La dureté et la température de ramollissement dépendent du degré d'élimination des huiles au cours de la distillation. La dureté de la poix diminue quand la proportion d'huile augmente.

En mélangeant la poix avec du goudron ou avec de l'huile anthracénique, on obtient des mélanges ayant d'excellentes propriétés de liant. Ces mélanges se ramollissent peu sous l'action du soleil ; ils ne sont pas fragiles et ont des propriétés d'adhérence élevées.

On utilise les mélanges goudron-poix et poix-huile anthracénique pour fabriquer les bétons de goudron (revêtements routiers et dans la construction des routes), des matériaux de couverture, des mastics d'adhérence et mastics décoratifs.

En faisant varier les proportions relatives de poix et de goudron (ou d'huile anthracénique) on peut obtenir des compositions ayant diverses viscosités et diverses températures de ramollissement. La fragilité et la température de ramollissement sont d'autant plus élevées que la proportion de poix est plus forte. On choisit les proportions relatives de poix et de goudron en fonction des conditions d'emploi du matériau obtenu.

A noter que les matériaux à base de goudron sont imputrescibles à l'inverse des bitumes. Ils contiennent en effet des phénols, qui sont toxiques ; on doit donc les manier avec précaution.

§ 5. ÉMULSIONS DE BITUME, ÉMULSIONS DE GOUDRON

Dans la construction et la fabrication des matériaux de construction, les bitumes, goudrons et poix sont employés principalement à l'état chaud. A l'état froid, ces produits ont en effet une forte viscosité, manquent de mobilité et ne sont pas faciles à appliquer. Les matériaux bitumineux chauds ne peuvent être employés que par temps sec et avec des agrégats secs. On peut améliorer la fluidité des bitumes de pétrole et des poix provenant de la houille, non seulement par le chauffage, mais encore par addition de diluants organiques. Par exemple, si on dissout la poix de houille dans le « solventnaphte » (fraction légère de la distillation du goudron de houille), on obtient le vernis dit du « Kouzbass », qui est un liquide facile à appliquer sur une surface

peinte. Actuellement, on utilise pour la construction des routes des bitumes de pétrole liquides, très bien mis en place à froid.

Les bitumes et goudrons liquides sont des émulsions, c'est-à-dire des systèmes finement dispersés constitués par de l'eau et du bitume ou de l'eau et du goudron. Dans ces émulsions, le bitume ou le goudron est uniformément dispersé dans l'eau sous forme de fines particules d'une grosseur de 0,001 à 0,1 mm. Afin de réduire la tension superficielle à la limite du bitume (ou du goudron) et de l'eau, on ajoute à l'émulsion un émulsifiant (savon, résine, caséine, amidon, colle, résidus pétroliers oxydés, etc.) qui s'oppose à leur coagulation.

Les émulsions contiennent généralement environ 50% d'eau, 45% de bitume et 0,01 à 5% d'émulsifiant.

Les liants liquides bitumineux et goudronneux de ce genre servent au traitement à froid des revêtements routiers, à peindre les couvertures, aux travaux d'étanchéité et à fabriquer des cartons résistant à l'eau.

On fabrique les émulsions bitumineuses et goudronneuses dans des mélangeurs et des homogénéiseurs. Les mélangeurs à faible vitesse de rotation donnent des émulsions dont la dispersion n'est pas très fine (particules relativement grosses).

On prépare de la façon suivante les émulsions aqueuses à partir de bitumes peu fusibles. Dans une chaudière cylindrique contenant un mélangeur à palettes, on verse de l'eau réchauffée jusqu'à 90° et un émulsifiant. Ensuite, on y envoie un jet fin de bitume ou de goudron réchauffé jusqu'à 115-120° et liquide. Le mélangeur tourne à environ 120 tr/mn. Ce traitement produisant une mousse abondante, la chaudière ne doit être remplie qu'à 30% de sa capacité.

On obtient une émulsion d'excellente qualité dans les conditions suivantes : le produit bitumineux doit être suffisamment réchauffé afin d'empêcher le refroidissement du mince jet envoyé dans la chaudière ; la température de l'eau ne doit pas dépasser de plus de 20 °C la température de ramollissement du bitume ; enfin, l'arbre du mélangeur doit tourner à une vitesse suffisante (au moins 115 tr/mn).

Les homogénéiseurs donnent des émulsions très résistantes (constituées par des particules bitumineuses plus fines et égales). Le mélange de liant liquide et d'eau avec l'émulsifiant pénètre dans l'intervalle compris entre les disques

et l'enveloppe. Les disques tournant à grande vitesse (jusqu'à 3000 tr/mn), le bitume est pulvérisé sous l'effet de la force centrifuge dans le milieu aqueux. L'émulsifiant contenu dans l'eau enrobe les particules de liant et leur donne une stabilité ou résistance suffisante.

La fig. 133 représente une émulsion grossière observée au microscope, et la fig. 134 montre une émulsion obtenue à l'aide d'un homogénéisateur.

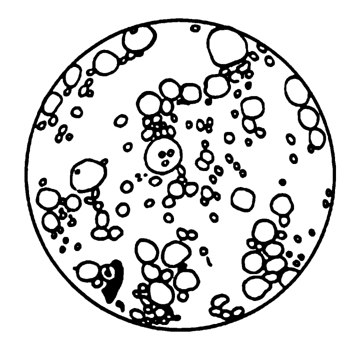


Fig. 133. Aspect microscopique d'une émulsion grossière (dispersion non poussée)

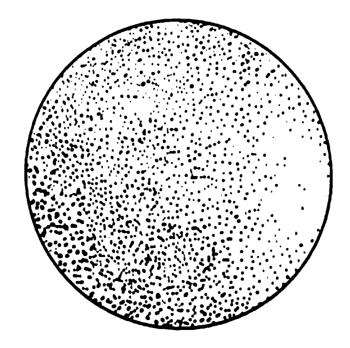


Fig. 134. Aspect d'une émulsion finement dispersée, obtenue au moyen d'un homogénéisateur

Une émulsion satisfaisant les exigences techniques a une faible viscosité (ce qui permet de la déverser et de l'appliquer à froid) ; elle est homogène, se détruit très lentement et a une stabilité suffisante pour supporter le transport et le stockage.

Les émulsions sont transportées dans des tonneaux ou camions-citernes et stockées dans des locaux dont la température n'est pas inférieure à 0 °C. Il faut veiller spécialement à la propreté des récipients parce que certaines impuretés contaminant accidentellement une émulsion peuvent provoquer sa destruction rapide.

§ 6. MORTIERS ET BÉTONS D'ASPHALTE ET DE GOUDRON

Un mortier d'asphalte est un mélange compact et intime d'un liant asphaltique (bitume contenant des agrégats minéraux fins) et de sable.

Un mortier de goudron est un mélange de goudron (ou de goudron et de poix), d'agrégats finement dispersés et de sable.

Les bétons d'asphalte et bétons de goudron sont des mélanges compacts et intimes de certains composants minéraux (pierraille ou gravier, sable et poudre minérale) avec des liants bitumineux (bitumes, goudrons et poix).

On emploie largement dans le bâtiment les mortiers d'asphalte comme étanchéité (appliqués sur les surfaces intéressées, sous forme d'enduits) et pour sols en asphalte. Les mortiers de goudron sont moins utilisés parce qu'ils durent moins longtemps.

Après le durcissement qui résulte du refroidissement du bitume, le mortier d'asphalte doit être suffisamment compact, imperméable à l'eau et avoir une bonne résistance mécanique et une bonne résistance à la chaleur, pour ne pas se ramollir sous l'effet des rayons solaires ou des températures maximales de service.

La résistance des mortiers d'asphalte à la chaleur diminue si on emploie une quantité excessive de bitume ou si on emploie un bitume dont la température de ramollissement est trop faible.

Le sable employé dans les mortiers d'asphalte doit être propre et sec, comporter un volume de vides aussi réduit que possible et ne pas contenir de grains de plus de 5 mm de grosseur.

La quantité de bitume employée dans un mortier doit être suffisante pour combler les vides entre les agrégats minéraux, compte tenu d'un certain excédent (10 à 15% du volume des vides) pour enrober les grains des agrégats. La quantité totale de bitume dans un mortier doit être de 9 à 10% y compris le bitume contenu dans la poudre d'asphalte, quand on emploie une telle poudre.

On prépare les mortiers d'asphalte soit dans des ateliers spéciaux soit sur les chantiers mêmes. Le mélange de bitume et des agrégats secs et réchauffés est déversé dans la chaudière de cuisson, et l'on chauffe ce mélange jusqu'à 180 °C en brassant constamment. Lorsque le mortier est parfaitement homogène et chaud, on le délivre à pied d'œuvre. On étend de 2 à 2,5 cm de mortier sur la chape sèche et bien tassée ; ensuite, on l'aplanit à l'aide d'une truelle ou bien on le tasse avec des rouleaux mécaniques.

On classe les bétons d'asphalte et bétons de goudron d'après leur fluidité, leur mise en œuvre et la grosseur des grains minéraux.

Au point de vue de la fluidité, les bétons peuvent être soit des bétons secs, soit des bétons plastiques à leur mise en place. On tasse ou comprime les bétons secs par cylindrage ou par vibration, alors que les bétons plastiques d'asphalte n'ont pas besoin d'être fortement tassés.

D'après le mode d'emploi, les bétons d'asphalte et bétons de goudron se divisent en bétons mis en place à l'état chaud et bétons mis en place à l'état froid. En ce qui concerne la grosseur des agrégats minéraux, ces bétons peuvent être à gros grains ($d = 35$ mm), à graains moyens ($d = 25$ mm), à grains fins ($d = 15$ mm), ou être constitués par du sable ($d = 5$ mm).

Les bétons d'asphalte durant plus longtemps que les bétons de goudron sont les plus employés dans la construction.

Les bétons d'asphalte sont fabriqués en usine. On a souvent recours à la fabrication cyclique. Ce système consiste à exécuter toutes les opérations de fabrication d'une charge pendant un temps déterminé, ou cycle. C'est ce système cyclique qui est utilisé pour préparer les mélanges de béton d'asphalte dans une installation de mélange du type Д-138.

On travaille simultanément trois charges de 1,5 à 3,0 t. La première charge est en phase de dosage, la deuxième en phase de séchage et chauffage dans le tambour de séchage, et la troisième en phase de brassage et mélange avec le liant, dans un mélangeur à tambour. Les opérations une fois terminées les charges sont conformément décalées à l'aide de gouttières de dérivation. On dose de nouvelles charges minérales et on obtient un mélange de béton d'asphalte prêt.

Lors de la mise en place, les bétons d'asphalte chauds doivent avoir une température de 130 à 160 °C, et les bétons de goudron chauds une température de 90 à 110 ° C. Outre les bétons d'asphalte et de goudron chauds on emploie également les bétons froids, qui sont fabriqués avec des bitumes et goudrons fluides. Les mélanges froids sont constitués par des mâchefers ou calcaires concassés et par du goudron de houille ou du bitume liquide. Parmi ces bétons, le plus employé est le béton d'asphalte à grains fins. Les bétons froids durcissent en quelques jours du fait que les matiè-

res diluantes s'oxydent, s'évaporent et sont partiellement absorbées par la chape.

On utilise les bétons froids pour les revêtements routiers. Comparativement aux bétons d'asphalte ordinaires leur préparation est plus simple et meilleur marché et leur mise en place plus commode. On peut en effet les mettre en place toute l'année durant par temps humide ou froid. En outre, les bétons froids peuvent être stockés dans les entrepôts durant un laps de temps prolongé.

§ 7. MATÉRIAUX BITUMINEUX POUR COUVERTURES ET ÉTANCHÉITÉS

On appelle ainsi des matériaux contenant du bitume ou du goudron, des huiles de goudron et de la poix et destinés aux couvertures et aux étanchéités.

On divise ces matériaux en matériaux bitumineux et matériaux goudronneux, selon la nature des liants employés.

Dans le bâtiment on emploie les matériaux bitumineux et les étanchéités préparés par imprégnation d'un support (carton spécial) avec des bitumes de pétrole ou de goudron. Le support est ensuite recouvert d'une composition moins fusible, puis d'un saupoudrage d'une matière granuleuse. Ces produits sont appelés produits *en rouleaux* parce qu'ils sont délivrés en rouleaux sur le chantier.

On pose en général les matériaux bitumineux en rouleaux sur des mastics. Dans les revêtements à couches multiples, les couches de mastic jouent un rôle important dans l'étanchéité des couvertures.

Soumis à l'action directe des agents atmosphériques, les matériaux de couverture et d'étanchéité en bitume se comportent mieux que les matériaux en goudron. Aussi les étanchéités à goudron ne sont utilisées que comme couverture des constructions provisoires ou peu importantes. Les étanchéités saupoudrées de gros grains font exception à cette règle.

L'emploi très répandu des matériaux bitumineux de couverture dans le bâtiment (et en particulier dans les constructions industrielles) s'explique par leurs nombreux avantages. Peut citer en particulier : la légèreté, la possibilité de réaliser une couverture de forme quelconque et à faible pente, ce qui réduit son prix de revient ainsi que la consommation en matières (la surface d'une couverture

est d'autant moins grande que sa pente est plus faible) ; les frais d'entretien très inférieurs à ceux des couvertures en tôle d'acier ; capacité de résister aux agents chimiques (par exemple, étanchéités des usines chimiques et métallurgiques).

Cependant, à côté de leurs avantages, les matériaux bitumineux de couverture ont également les inconvénients suivants : durée plus faible (en particulier pour les matériaux goudronneux) que celle par exemple des tuiles ou de l'amiante-ciment ; combustibilité (bien que le saupoudrage minéral empêche une inflammation côté surface) ; nécessité d'employer un coffrage continu (c'est seulement grâce à ce coffrage et à un collage au moyen de compositions bitumineuses ou goudronneuses spéciales que ces étanchéités ne se déchirent pas et qu'elles se conservent bien en service).

Tableau 17

Caractéristiques physiques et mécaniques du carton pour couvertures

Caractéristiques	Marque ou qualité du carton						
	A650	A420	A350	A300	Б420	Б350	Б300
	Valeurs normalisées						
Poids de 1 m² (g) à humidité normale	650	420	350	300	420	350	300
Tolérance sur le poids (%)	±10	±8	±10	+5 −10	±8	±10	+5 −10
Humidité maxi (%)	5	5	5	5	6	6	6
Imprégnation mini (%)	140	140	140	140	125	125	125
Durée d'imprégnation en s, au plus	50	50	50	50	60	60	60
Porosité en %, au moins	63	63	63	63	60	60	60
Charge de rupture en kg, au moins	26	22	18	18	22	18	18

Pour fabriquer les matériaux de couverture en rouleaux, on emploie un carton de couverture spécial, fabriqué sur

des machines de cartonnage, avec un mélange de chiffons, de déchets de papier et de cellulose broyés.

Les fabriques soviétiques produisent 7 marques ou qualités différentes de carton pour couvertures : A650, A420, A350, A300, Б420, Б350 et Б300. Les largeurs sont de 750 et 1 000 mm.

On caractérise la résistance d'un carton par sa résistance à la rupture, mesurée sur une feuille de 50 mm de large. On exprime cette résistance en kg.

Le tableau 17 énumère les caractéristiques physiques et mécaniques des marques de carton pour couvertures précitées.

a) Matériaux bitumineux de couverture

Rubéroïde

Le rubéroïde est un matériau d'étanchéité en rouleaux pour couvertures. Il est fabriqué par imprégnation du carton de couverture par des bitumes de pétrole tendres. Ce carton est ensuite recouvert, sur l'une ou les deux faces, de bitume de pétrole peu fusible. On répand ensuite sur sa surface une mince couche minérale à fine mouture (généralement du talc). On fabrique également le rubéroïde saupoudré de gros grains qui le protègent contre les effets atmosphériques nuisibles, ainsi que le rubéroïde saupoudré de lamelles de mica. La matière saupoudrée à gros grains peut être de couleurs diverses, ce qui améliore l'aspect de ce matériau dans les couvertures des immeubles d'habitation.

La fabrication du rubéroïde peut être décomposée de la façon suivante :

1) préparation de la matière d'imprégnation et de revêtement, par fusion du bitume dans une chaudière à 180-200 °C, ou par oxydation dans un convertisseur ;

2) préparation de la matière granuleuse de saupoudrage ;

3) imprégnation de la feuille ou bande de carton dans une cuve d'imprégnation ;

4) application d'un bitume (avec agrégat) d'épaisseur nécessaire sur les deux faces ; ce bitume doit avoir une température de ramollissement d'au moins 85 °C d'après l'appareil « à bague et bille », après passage du carton imprégné par la cuve de revêtement ;

5) déversement des matériaux granuleux de saupoudrage, débités par une trémie sous laquelle défile le carton imprégné recouvert de bitume ;

6) refroidissement du produit sur des cylindres refroidis à l'eau ou par tout autre procédé ;

7) refroidissement final dans des boucles du compartiment de réserve ;

8) sectionnement de la bande en tronçons de longueur normalisée et enroulement en rouleaux.

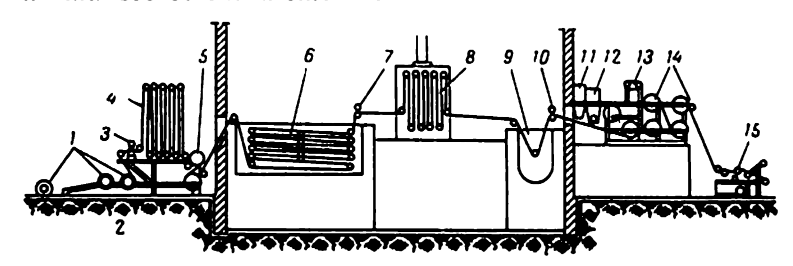


Fig. 135. Schéma d'une installation de fabrication de rubéroïde : 1 — bobines de carton ; 2 — dérouleuse ; 3 — machine à coudre; 4 — compartiment de réserve de carton ; 5 — cylindres de séchage ; 6 — cuve d'imprégnation ; 7 — rouleaux d'essorage ; 8 — compartiment d'imprégnation complémentaire; 9 — bain de revêtement; 10 — rouleaux d'essorage; 11 à 13 — trémies de saupoudrage ; 14 — tambours de refroidissement ; 15 — enrouleuse

La fig. 135 montre le schéma d'une installation de fabrication de rubéroïde.

D'après la nature du saupoudrage de la face extérieure tournée vers l'intérieur du rouleau, on distingue les rubéroïdes suivants : à saupoudrage minéral fin, à saupoudrage écaillé constitué par un schiste micacé, et à saupoudrage à gros grains. La face inférieure d'un rubéroïde à double face (c'est-à-dire la face extérieure des rouleaux) peut être également saupoudrée d'un minéral fin (talc).

Les rubéroïdes de toutes catégories doivent contenir un agrégat dans la couche de couverture.

Les rubéroïdes à une seule face, marques РОЧ et РОМ, sont destinés à constituer la couche supérieure d'une couverture. On les colle avec du mastic chaud. Le rubéroïde à double face marque РМ est employé pour toutes les couches d'une couverture, tandis que le rubéroïde marque РЧ n'est employé que pour la couche supérieure. On colle les rubéroïdes à double face avec du mastic froid. Les rubéroïdes РМ et РОМ peuvent servir d'étanchéité.

Le rubéroïde est fabriqué en rouleaux de 75 et 100 cm de large. La surface totale d'un rouleau est de $20 \pm 0{,}5$ m^2.

Les divers rubéroïdes sont classés en marques ou qualités (voir le tableau 18) selon le poids du carton de couverture par m^2, selon que le carton est recouvert de bitume peu fusible sur une seule face ou sur les deux faces et selon la nature du saupoudrage.

Tableau 18

Caractéristiques des marques (qualités) de rubéroïde

Marque	Revêtement de bitume peu fusible	Saupoudrage	Poids du carton par m² (g) à une humidité de 5%		Poids du rouleau (kg), au moins
PM-500	Sur les deux faces	Minéral fin sur les deux faces	500	±10%	30
PM-350			350		24
POM-500	Sur une face	Minéral fin sur les deux faces	500		26
POM-350			350		20
PЧ-500	Sur les deux faces	Lamelles sur une face	500		32
Ч-350			350		26
POЧ-500	Sur une face	Lamelles sur une face	500		28
POЧ-350			350		22

La couche de couverture et le saupoudrage de type écaillé doivent être appliqués en une couche uniforme et continue sur la surface du rubéroïde.

Tous les rubéroïdes à saupoudrage en lamelles doivent avoir sur leur face extérieure une bordure nette sans saupoudrage, dont la largeur doit être comprise entre 7 et 10 cm.

Les feuilles de rubéroïde ne doivent pas être collantes, ni être fissurées, trouées, déchirées ou plissées. En coupe, le rubéroïde doit être noir ou noir teinté de brun, ne pas comporter de zones claires de carton non imprégné et ne pas contenir d'inclusions étrangères.

Les diverses marques de rubéroïde doivent remplir les conditions indiquées au tableau 19.

Tableau 19

Caractéristiques techniques des diverses marques (qualités) de rubéroïde

Caractéristiques	Qualités							
	РМ-500	РМ-350	РОМ-500	РОМ-350	РЧ-500	РЧ-350	РОЧ-500	РОЧ-350
	Valeurs normalisées							
Quantité de matière de revêtement en g/m², au moins	500	500	350	350	500	500	350	350
Charge de rupture à la traction d'une bande de rubéroïde de 50 mm de largeur (en kg), au moins	36	32	34	30	36	32	34	30
Flexibilité à 18±2° C d'une bande de rubéroïde pliée sur la demi-circonférence d'une tige de 20 mm de diamètre	Aucune fissuration ne doit apparaître				Aucune fissuration et aucun décollage de lamelles du revêtement ne doivent apparaître			

Observations: 1) Pour toutes les marques de rubéroïde, la température de ramollissement de la matière d'imprégnation selon la méthode « bague et bille » ne doit pas être inférieure à 42 °C, et celle de la matière de revêtement doit être comprise entre 85 et 95 °C.

2) Pour toutes les marques de rubéroïde, le rapport du poids de la matière d'imprégnation au poids du carton parfaitement sec adopté comme unité ne doit pas être inférieur à 1,13 : 1,0.

3) Pour toutes les marques de rubéroïde, la matière de revêtement doit contenir au moins 25 % de charge pulvérulente, 15 % de charge fibreuse et 20 % de charge composite.

4) Après chauffage à 70 °C pendant 5 heures, la perte de poids ne doit pas dépasser 0,5 % pour toutes les marques.

Ce chauffage ne doit provoquer ni glissement du saupoudrage, ni gonflement, ni aucun autre défaut dans la couche de revêtement.

Les matériaux bitumineux pour couvertures peuvent servir pour des couvertures à faible pente ou presque planes. La pente normale est de 7 à 15 °.

Suivant la pente, les bandes de rubéroïde sont posées perpendiculairement ou parallèlement au faîtage. Les bandes doivent se recouvrir mutuellement de 5 à 7 cm. Les couches successives doivent être placées de façon que les joints de la couche inférieure soient décalés par rapport à ceux de la couche supérieure.

Le rubéroïde à deux faces est posé sur un mastic froid, le rubéroïde à une seule face sur un mastic chaud.

Avant de procéder au collage, il faut soigneusement dégarnir la face inférieure du rubéroïde de son talc, afin d'assurer une adhérence énergique.

Parchemin artificiel

Le parchemin artificiel est un matériau de couverture et d'étanchéité constitué par du carton de couverture imprégné de bitumes de pétrole. A la différence du rubéroïde, le parchemin artificiel n'est pas recouvert par une couche de bitume.

On fabrique le parchemin artificiel sur des installations spéciales ou bien sur des machines de fabrication de rubéroïde. Dans cette éventualité, on n'utilise ni le bain de revêtement, ni les trémies de saupoudrage, ni une grande partie de l'équipement frigorifique. Les installations spéciales comprennent une dérouleuse de carton, un compartiment de réserve de carton, une cuve d'imprégnation avec ses rouleaux d'essorage, des cylindres refroidisseurs et une enrouleuse.

Pour fabriquer le parchemin artificiel on utilise un bitume de pétrole dont la température de ramollissement n'est pas inférieure à 42 °C, suivant la méthode « bague et bille ».

Selon les spécifications techniques, on fabrique 4 marques ou qualités de parchemin artificiel : П-350, П-300, П-250, et П-200. La largeur varie de 65 à 105 cm. La surface d'un rouleau est de 20 ± 0,5 m². Les rouleaux des marques précitées doivent peser respectivement au moins 13, 11, 9 et 7 kg. Les charges de rupture doivent être respectivement au moins 27, 25, 22 et 20 kg, les mesures étant faites sur une bande de parchemin artificiel de 50 mm de large.

Le parchemin artificiel est essentiellement destiné aux couches inférieures des couvertures à couches multiples posées sur des mastics chauds. Ensuite, on badigeonne ces couvertures avec des mastics bitumineux, on les recouvre d'une couche continue de gravier ou de mâchefer, et on les protège avec des dalles. On utilise également le parchemin artificiel dans les bâtiments de toutes catégories, comme sous-couche du rubéroïde. Dans ce cas, on le pose sur un mastic chaud.

Les bandes de parchemin artificiel sont collées à la couverture de la même façon que les bandes de rubéroïde (voir plus haut).

b) Etanchéités bitumineuses

Hydroisol

Il a été reconnu que pour les travaux d'étanchéité sérieux l'emploi des matériaux bitumineux sur un support de carton organique (rubéroïde ou parchemin artificiel) est à éviter, car ces matières gonflent vu le haut pouvoir d'absorption d'eau du carton. Elles sont alors le siège de phénomènes de putréfaction, particulièrement importants dans les matériaux posés dans le sol ou au contact avec le sol.

Les matières à base d'amiante sont les étanchéités qui conviennent le mieux dans de telles conditions. L'hydroisol est une de ces matières.

L'hydroisol est une étanchéité sans revêtement en rouleaux, que l'on fabrique en imprégnant un papier d'amiante avec des bitumes de pétrole oxydés.

On utilise l'hydroisol comme étanchéité dans les ouvrages souterrains et autres, et comme revêtement anticorrosif sur les tuyauteries métalliques (à l'exception des tuyauteries de vapeur), et enfin comme étanchéité des toitures-terrasses.

On fabrique deux marques ou qualités d'hydroisol : Ги-1 et Ги-2. Les caractéristiques qualitatives de ces deux marques sont indiquées au tableau 20.

On fabrique l'hydroisol en rouleaux d'une largeur de 950 $\pm$ 5 mm et d'une longueur de 20 $\pm$ 0,4 m.

L'hydroisol doit être enroulé d'une façon serrée. Les couches successives ne doivent pas se coller. Un rouleau doit contenir au maximum deux bandes d'hydroisol, la plus courte devant avoir au moins 3 m de long. La proportion de

Tableau 20

Caractéristiques physiques et techniques de hydroisol

Caractéristiques	Marque	
	Ги-1	Ги-2
Température de ramollissement de la matière d'imprégnation (°C) par la méthode «bague et bille», après extraction	50 à 60	
Rappot du poids de la matière d'imprégnation au poids du papier parfaitement sec, au moins	0,60 : 1	0,55 : 1
Charge de rupture à la traction (kg), mesurée sur une feuille de 50 mm de large, au moins	30	
Imperméabilité sous la pression d'une colonne d'eau de 5 cm en jours, au moins	30	20
Stratification de l'hydroisol à l'état saturé d'eau en cm^2 de surface stratifiée, au plus	10	15
Flexibilité à $10 \pm 2°$ C : nombre de pliages doubles de 180° avant fissuration débouchante, au moins	10	
Saturation d'eau maximale en 24 h (% en poids), au plus	10	13
Perte de résistance d'un échantillon saturé d'eau (%), au plus	25	32

rouleaux en plusieurs pièces contenus dans un lot ne doit pas dépasser 5%. Les bords des bandes doivent être sectionnés d'une façon nette.

Une bande d'hydroisol ne doit présenter ni fissurations, ni trous, ni déchirures, ni plissements. La surface de l'hydroisol doit être mate et lisse, et ne présenter aucun bossage. Des taches luisantes (de graisse) ne provoquant pas le collage des couches du rouleau sont tolérées sur la surface.

L'hydroisol en coupe est noir ou noir teinté de brun, exempt de couches claires de papier non imprégné et d'inclusions étrangères.

L'hydroisol sert d'étanchéité collée avec des mastics bitumineux dans des ouvrages des première et deuxième

classes devant résister à la putréfaction. La fig. 136 montre l'étanchéité d'un tunnel pour canalisations de distribution de chaleur, avec emploi d'hydroisol.

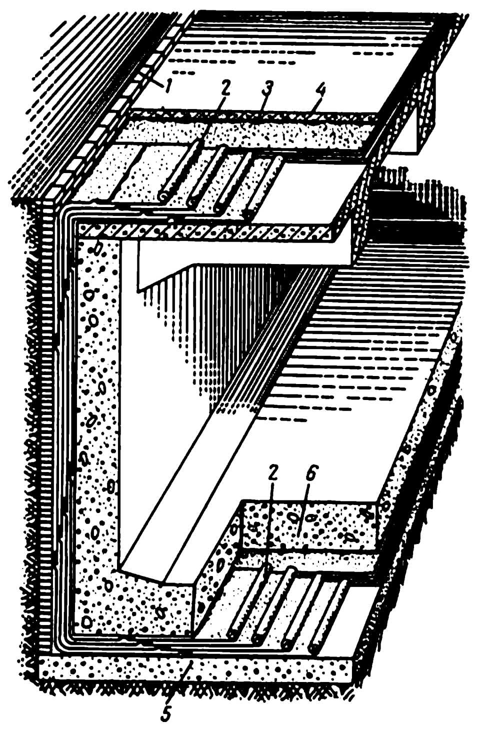


Fig. 136. Etanchéité d'un tunnel avec l'hydroisol :
1 — mur en briques de 12 cm d'épaisseur ; 2 — hydroisol ; 3 — mastic bitumineux ; 4 — couche de protection; 5 — chape ; 6 — béton

Métalloisol

On fabrique le métalloisol avec de minces feuilles d'aluminium (clinquant) recouvertes de bitume sur les deux faces. Ce produit associé à d'autres étanchéités sert d'étanchéité collée dans les ouvrages hydrotechniques et souterrains. Ce matériau est une excellente étanchéité.

Les feuilles d'aluminium qui servent à fabriquer le métalloisol doivent remplir les conditions suivantes : épais-

seur de 0,2 ± 0,02 mm, largeur de 460 ± 1,5 mm, résistance minimale à la traction 7,5 kg/mm², allongement relatif minimal 20%. Le clinquant d'aluminium doit être recuit. Pour le revêtement on utilise le bitume de pétrole marque БН-IV avec 25% d'agrégats (fibre d'amiante).

On distinge les métalloisols de marques ou qualités MA-550 et MA-270, selon le poids d'un mètre carré de support. Un rouleau de métalloisol doit avoir une surface de 5 ± 0,5 m², et un poids d'au moins 10 kg pour la marque MA-270 et d'au moins 16 kg pour la marque MA-550.

Aucune fissure dans la couche superficielle de bitume ne doit apparaître lorsque la bande est appliquée sur la demi-circonférence d'une tige de 20 mm de diamètre, à la température de 20 °C.

Une feuille pliée (sous un angle de 180°) à dix reprises successives ne doit pas présenter des fissures débouchantes.

Le métalloisol est imperméable, plastique, possède une grande résistance mécanique et résiste bien à la putréfaction. Son support peut s'allonger considérablement à la traction, facteur intéressant en cas de déformations de l'ouvrage rendu étanche.

En se servant du métalloisol comme étanchéité, il ne faut pas oublier que le support d'aluminium se corrode sous l'action des alcalis, dans le cas où le revêtement de bitume est détérioré. Il faut conserver le métalloisol dans de bonnes conditions, et le manier convenablement. Ne pas mettre en place le métalloisol quand la température de l'air est inférieure à + 10 °C.

c) Matériaux à base de goudron

Carton goudronné saupoudré de sable

On fabrique le carton goudronné pour couvertures en imprégnant du carton avec du goudron, et en saupoudrant ensuite les deux faces de sable.

Cette fabrication comprend trois opérations principales :

1) préparation de la matière d'imprégnation et de revêtement (dans des chaudières de cuisson chauffées à la vapeur) ;

2) préparation de la matière de saupoudrage ;

3) imprégnation du carton et application du revêtement et du saupoudrage.

Pour préparer la matière d'imprégnation, on élimine l'eau du goudron, on sépare les fractions légères par distillation, on fait fondre la poix et on la mélange avec le goudron.

La matière que l'on emploie pour le saupoudrage est un sable de rivière séché et criblé. Ce sable doit être propre, et ne pas contenir de particules pulvérulentes (argileuses ou limoneuses) ou autres impuretés. Les sables qui conviennent le mieux sont des sables à grains de 0,15 à 3 mm.

Les marques ou qualités des cartons goudronnés de couvertures sont les suivantes : ТП-350 et ТП-300.

Les cartons goudronnés de qualité supérieure sont recouverts par une couche uniforme de matière de saupoudrage. Les trous, les déchirures, les plis et les bossages ne sont pas tolérés. En coupe, la matière est noire et ne doit comporter aucune région claire de carton non imprégné, ni aucune inclusion étrangère. Les bords des bandes ne doivent pas présenter de déchirures, et les extrémités d'un rouleau doivent être lisses. Il ne doit pas exister de zones d'adhérence à l'intérieur d'un rouleau. Les rouleaux ont une largeur de 75 ou de 100 cm, et une surface de 20 ± 5 m² ou bien 10 ± 5 m².

La température de ramollissement de la masse d'imprégnation des cartons goudronnés est de 34 à 40 °C, selon la méthode « bague et bille ». Le rapport du poids de la masse d'imprégnation au poids du carton sec doit être d'au moins 2,1 : 1,0. Après un chauffage de 5 heures à 70 °C, la perte de poids ne doit pas dépasser 4% du poids de la matière d'imprégnation (cette perte de poids exprime la constance des propriétés du carton goudronné dans le temps). On caractérise l'imperméabilité d'un carton goudronné par le temps nécessaire aux premières couches d'eau pour traverser son épaisseur. Sous l'effet d'une colonne d'eau de 5 cm, les traces d'eau ne doivent pas apparaître avant 5 jours.

Carton goudronné sans revêtement

On appelle ainsi un matériau de couverture et d'étanchéité que l'on obtient en imprégnant un carton de couverture avec des goudrons de houille. Un carton goudronné de qualité supérieure est noir et ne présente aucun trou ni aucune bosse. On admet la présence de quelques taches grasses résultant d'un essorage local insuffisant dans les cylindres (sous réserve que les taches ne provoquent pas le collage du carton).

On fabrique les marques ou qualités suivantes de carton goudronné sans revêtement : TK-350, TK-300, TK-250 et TK-200.

En coupe, un carton goudronné normal est noir, sans aucune zone claire de carton non imprégné ni aucune inclusion étrangère. Les bords d'une bande ne doivent pas présenter de déchirures, et les extrémités d'un rouleau doivent être lisses. La bande a une largeur de 75 ou de 100 cm, et la surface totale de la bande en rouleau est de $30 \pm 0{,}5$ m². La température de ramollissement de la matière d'imprégnation est de 34 à 40 °C selon la méthode « bague et bille ». Le rapport du poids de la matière d'imprégnation au poids du carton est de 1,15 : 1,0. La perte de poids après chauffage pendant 5 heures à 70 °C ne doit pas dépasser 3,5%. La saturation en eau au bout de 24 heures ne doit pas dépasser 25% en poids.

On emploie les cartons goudronnés sans revêtement comme sous-couche des cartons goudronnés de couverture et aussi pour constituer les couches d'étanchéité des soubassements et des murs ou encore comme couches pare-vapeur dans les murs et planchers des bâtiments.

Les matériaux goudronneux de couverture résistent mieux à la putréfaction que les matériaux bitumineux (rubéroïde, parchemin artificiel). Ils durent plus longtemps dans un milieu humide à condition de ne pas être soumis à l'action de la lumière.

Carton goudronné à saupoudrage à gros grains

Les cartons goudronnés à saupoudrage à gros grains constituent un matériau de couverture en rouleaux fabriqué par imprégnation d'un carton de couverture par des produits goudronneux de houille. Après l'imprégnation du carton, on recouvre les deux faces d'une couche de goudron moins fusible et contenant des agrégats minéraux, et l'on saupoudre la face extérieure avec un minéral à gros grains.

Les cartons goudronnés à saupoudrage à gros grains constituent la couche supérieure d'une étanchéité.

Les cartons goudronnés sont fabriqués en rouleaux d'une largeur de 65 à 105 cm et d'une surface totale de $10 \pm 0{,}5$ m². Chaque lot de cartons goudronnés ne doit comprendre que des rouleaux d'une seule largeur.

La matière de couverture est appliquée sur le carton en couche uniforme continue sur toute la surface. On saupoudre la face extérieure d'un minéral à gros grains constituant une couche compacte et uniforme. On imprime ensuite le saupoudrage dans le revêtement. La face inférieure du carton peut être recouverte par une substance minérale finement broyée.

La face extérieure du carton goudronné doit comporter un bord dépourvu de saupoudrage d'une largeur comprise entre 7 et 10 cm.

Le matériau de saupoudrage ainsi que les matériaux employés pour le peindre doivent résister aux agents atmosphériques. La peinture ne doit pas être diluée par l'eau.

d) Mastics bitumineux

On fabrique un mastic bitumineux en partant d'un bitume de pétrole d'une seule marque ou d'un mélange de bitumes de diverses marques, avec ou sans addition d'agrégats pulvérulents ou fibreux.

Les agrégats peuvent être fibreux (amiante, fibre de bois), pulvérulents (talc, diatomite, calcaire broyé), ou mieux encore, être constitués par un mélange de ces deux catégories. On introduit ces agrégats dans le mastic pour réduire la consommation de bitume, améliorer sa résistance à la chaleur, et réduire sa fragilité aux basses températures.

D'après le procédé d'application et la composition, on distingue les mastics bitumineux froids et les mastics bitumineux chauds.

On emploie les mastics bitumineux chauds pour coller les matériaux bitumineux en rouleaux dans l'aménagement des couvertures et des étanchéités. On les emploie également pour améliorer l'aspect des couvertures en parchemin artificiel quand celles-ci sont recouvertes d'une couche continue de mâchefer ou de gravier fin. Les mastics avec agrégats servent à peindre les couvertures qui ne sont pas ensuite recouvertes de mâchefer ou de gravier.

On fait cuire les mastics bitumineux dans des chaudières chauffées à la flamme, et l'on brasse la masse très activement pendant le chauffage. Au début de la cuisson, on introduit dans la chaudière de petits morceaux de bitume, en commençant par les bitumes les plus fusibles. Quand on atteint une température de 180 ° à 190 °C, on ajoute successivement de petites quantités (préalablement pesées) d'agrégats parfai-

tement secs. A cette phase, aucun agrégat de fibre de bois ne doit être introduit. La fibre de bois et les autres agrégats organiques sont directement introduits dans le récipient débitant le mastic. Dès que le mastic devient homogène, on arrête la cuisson.

Pour préparer un mastic froid, on introduit le bitume dans une chaudière contenant un agitateur, et l'on fait fondre ce bitume. Après refroidissement du bitume dans la chaudière jusqu'à environ 130 ou 140 °C, on introduit un diluant (savon vert, « lakoyl »), par doses ne dépassant pas 5 litres. La quantité nécessaire de diluant une fois introduite et la matière une fois refroidie dans la chaudière jusqu'à 70 ou 80° C, on ajoute l'agrégat préalablement séché (amiante, talc, terre d'infusoires), tout en brassant. On fabrique également les mastics froids par un autre procédé : on commence par mélanger l'agrégat avec le dissolvant ; ensuite on ajoute à ce mélange le bitume à l'état fondu. Ce dernier procédé réduit les pertes de dissolvant par évaporation.

Les mastics froids sont pratiques, en particulier par temps froid. Ils durcissent parce que le diluant pénètre dans la couche de revêtement ou dans la couche d'imprégnation de la feuille, et que les fractions légères de ce diluant s'évaporent.

L'utilisation des mastics froids réduit la consommation de bitume : avec un mastic chaud, on consomme 2,0 à 2,2 kg de bitume par m² sur surface de matériau, tandis qu'avec un mastic froid on ne consomme qu'environ 0,5 kg. Cette économie est atteinte par une diminution de l'épaisseur de la couche de mastic appliquée rendue possible par le fait que les mastics froids demeurent plastiques au-dessous de 0 °C. En outre, l'emploi des mastics froids réduit le prix de revient des couvertures et des étanchéités.

D'après les spécifications techniques, les mastics froids de première qualité ont une force d'adhérence de 15 kg et d'avantage trois jours au plus après leur emploi. Ils demeurent souples à —10 °C, et résistent bien à la chaleur jusqu'à +70 °C. Leur fluidité permet de les appliquer en une couche mince, dont le poids ne dépasse pas 0,5 kg/m².

e) Mastics de goudron

On emploie les mastics de goudron pour coller les matériaux goudronneux en rouleaux.

On fabrique les mastics de goudron à partir d'un goudron distillé ou d'un goudron mélangé, avec ou sans addition d'un agrégat (matière pulvérulente ou fibreuse, ou bien leur mélange), en usine ou plus souvent sur les chantiers de construction dans des chaudières chauffées à la vapeur ou à la flamme, tout en brassant énergiquement la matière.

Pour choisir la composition d'un mastic constitué par de la poix, du goudron ou de l'huile, on peut se servir de la formule empirique proposée par V. Krivtzov :

$$G = \frac{t_p - t_m}{1,75}, \qquad (49)$$

G étant la teneur en goudron de la charge, en % ;

t_p la température de ramollissement de la poix en degrés ;

t_m la température limite de résistance à la chaleur du mastic ;

1,75 le coefficient empirique.

Avant d'employer le mastic, il faut s'assurer que la résistance à la chaleur est effectivement celle désirée.

Il faut se conformer aux conditions suivantes durant la cuisson du mastic : introduire tout d'abord le goudron dans la chaudière et n'ajouter de petits morceaux de poix que lorsqu'il ne mousse plus ; faire croître progressivement la température à l'intérieur de la chaudière, sans dépasser 160 °C, tout en brassant énergiquement et continuellement. Ne pas soumettre le mastic à un chauffage prolongé. Les agrégats sont introduits à l'état sec, directement dans les récipients qui débitent le mastic.

Les mastics de goudron sont employés à l'état chaud (jusqu'à 140 ou 150 °C) pour constituer la couche de collage des couvertures ou des étanchéités en matériaux goudronneux en rouleaux. Ces mastics peuvent également constituer la couche de protection des couvertures en matériaux goudronneux.

On saupoudre le mastic d'une couche mince et continue de mâchefer ou de graviers fins (les mastics contenant un agrégat peuvent servir à améliorer l'aspect des couvertures, sans être ensuite saupoudrés). On emploie également les mastics de goudron pour protéger les tuyauteries contre la corrosion. On applique ces mastics à l'aide de brosses spéciales.

CHAPITRE XII

MATÉRIAUX ET PIÈCES EN MATIÈRE PLASTIQUE

Les matières plastiques sont constituées par des substances organiques résineuses à poids moléculaire élevé. Ces substances donnent aux matières plastiques la possibilité de prendre la forme que l'on désire à une certaine étape de la fabrication et de conserver cette forme la pression une fois supprimée. Autrement dit, ce sont des plastifiants.

Dans certains cas, les matières plastiques ne contiennent que des substances organiques résineuses ; dans d'autres, elles contiennent également des plastifiants, qui ont pour objet essentiel de donner de la souplesse. Outre les plastifiants, on peut également ajouter dans les matières plastiques diverses substances appelées charges. Les charges sont des matières dispersées dans la masse et destinées à accroître la résistance mécanique et thermique. De plus, elles réduisent le prix de revient des matières plastiques.

Les pigments minéraux introduits dans les matières plastiques leur donnent la couleur voulue.

Les matières plastiques sont donc des mélanges complexes de diverses substances, et principalement de résines artificielles à poids moléculaire élevé, que l'on obtient essentiellement par des procédés de polymérisation ou de condensation.

Les matières plastiques à base de résines artificielles n'ont fait leur apparition que relativement peu longtemps, mais elles se sont largement répandues dans de nombreux domaines de la technique (construction des machines, aviation, industrie textile, etc.) grâce à l'extrême diversité de leurs propriétés des plus intéressantes. Les matières plastiques n'ont pas pris une place considérable dans la technique des constructions, mais elles commencent actuellement à se répandre de plus en plus.

On peut diviser les matières plastiques en matières simples et matières composites, d'après le nombre des composants qu'elles comprennent.

Une matière plastique s i m p l e est constituée par un *polymère* à l'état pur (on obtient, par exemple, le verre organique d'une seule résine synthétique, qui est le polyméthacrylate de méthyle).

Dans la plupart des cas, on emploie dans la construction des matières plastiques complexes, c'est-à-dire constituées par un polymère, une charge et d'autres composants.

Les charges employées sont des substances pulvérulentes, fibreuses ou stratifiées.

Les c h a r g e s p u l v é r u l e n t e s sont des substances d'origine minérale : mica, sable, calcaire et autres minéraux broyés. Ces charges non seulement donnent à la matière plastique certaines propriétés nouvelles mais augmentent sa dureté, diminuent son prix de revient et accroissent sa durée, ce qui est très important dans la construction.

Les charges fibreuses sont très employées dans la fabrication des matières plastiques parce qu'elles augmentent leur résistance mécanique et réduisent leur fragilité.

Les charges fibreuses comprennent en particulier les fibres d'amiante, les peignures de coton, les fibres de bois, etc.

L'emploi de la fibre d'amiante améliore la résistance à la chaleur, la résistance mécanique et la résistance aux chocs des matières plastiques.

La charge la plus employée dans les matières plastiques est la fibre de verre. La fibre de verre communique aux matières plastiques des propriétés mécaniques élevées, facteur d'une grande importance dans la fabrication des éléments structuraux.

Les c h a r g e s s t r a t i f i é e s employées dans les matières plastiques sont le papier, le tissu de coton, les tissus en fibres de verre, le carton d'amiante et les feuilles de placage, certaines de ces feuilles étant imprégnées ou recouvertes d'une résine synthétique, empilées en couches de plusieurs feuilles et comprimées pour constituer une plaque ou une pièce d'une autre forme. La résistance mécanique élevée des matières plastiques constituées par des charges stratifiées et que l'on appelle des *stratifiés*, permet de fabriquer des pièces de construction destinées à supporter de fortes charges.

Lorsqu'on utilise une charge pulvérulente (par exemple de la farine de bois ou une poudre minérale) on obtient ce qu'on appelle des *poudres comprimées*, ou frittées, à l'aide desquelles on fabrique diverses pièces de construction par compression dans des moules (par exemple, les dalles de sols).

Si la charge est fibreuse (par exemple, fibre d'amiante), on obtient des matières plastiques que l'on appelle des *agglomérés* et qui permettent également de fabriquer des pièces par pression dans des moules.

En dehors des charges, les matières plastiques composites peuvent comprendre les composants suivants : plastifiants, colorants, lubrifiants, catalyseurs, etc. Pour obtenir des matières plastiques poreuses, on introduit dans leur composition des substances spéciales qui sont des générateurs de porosités, appelés quelquefois porophores ou porogènes. Ces dernières substances comprennent en particulier le carbonate acide de sodium et le carbonate d'ammoniaque, etc.

On introduit des plastifiants dans la composition des matières plastiques, pour donner à celles-ci une plus grande plasticité. Les plastifiants sont des substances qui peuvent dissoudre les polymères d'association. Ils doivent être inertes chimiquement et peu volatils. Les plastifiants employés dans les matières plastiques comprennent en particulier le camphre, l'oléine, le dibutylphtalate, etc.

Pour graisser les moules au cours de la fabrication des pièces en matière plastique, on ajoute de l'oléine, de la stéarine, etc. Ces substances empêchent la matière plastique d'adhérer au moule quand la pièce est comprimée.

On ajoute à certaines matières plastiques des substances de renforcement, par exemple l'urotropine. Ces substances sont nécessaires dans les *novolaques*, pour rendre celles-ci infusibles et insolubles au cours de la compression des pièces.

On ajoute des catalyseurs, ou accélérateurs, dans certaines matières plastiques, pour accélérer le durcissement. Par exemple, on emploie comme accélérateur la chaux, la magnésie ou l'urotropine pour les formophénoliques.

§ 1. PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES DES MATIÈRES PLASTIQUES EN TANT QUE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

La faible masse volumique des matières plastiques est une de leurs propriétés les plus intéressantes. La masse

volumique des matières plastiques généralement employées varie de 15 à 2 200 kg/m³, y compris les matières plastiques poreuses, dites *poroplastes*. On peut dire d'une manière générale que la masse volumique des matières plastiques, exception faite pour les poroplastes, est deux fois moins grande que celle de l'aluminium et 5 à 8 fois moins grande que celles de l'acier, du cuivre et du plomb.

La résistance mécanique élevée est une autre caractéristique des matières plastiques. Les matières plastiques stratifiées ont des résistances mécaniques particulièrement élevées. Par exemple, la résistance limite à la rupture de la textolite atteint 1 500 kg/cm² alors que celle de l'acier nuance 3 est de 3 800 à 4 500 kg/cm², celle du bois delta 3 500 kg/cm², et celle du CBAM de 4 800 à 9 500 kg/cm² (CBAM est la désignation abrégée d'un matériau anisotrope stratifié et fibreux).

Les chiffres précédents montrent que la résistance mécanique des matières plastiques stratifiées est extrêmement forte, et qu'il est parfaitement possible d'employer ces matières comme éléments structuraux porteurs.

Ces mêmes matières ont également une résistance limite à la compression suffisante, soit 2 000 kg/cm² pour le bois delta, 1 600 kg/cm² pour la textolite et 4 200 kg/cm² pour le CBAM.

Les matières plastiques à charge tant pulvérulente que fibreuse ont une résistance limite à la compression comprise entre 1 200 et 1 600 kg/cm², et une résistance limite à la flexion comprise entre 400 et 600 kg/cm².

On voit donc que les matières plastiques ont des résistances limites à la compression et à la traction suffisamment fortes et qui dépassent celles de nombreux matériaux de construction couramment employés actuellement dans la construction.

La faible conductivité thermique des matières plastiques est également un avantage dans les constructions. La conductivité thermique des matières plastiques compactes varie de 0,2 à 0,6 kcal/m·h·°C. Les matières plastiques poreuses les plus légères n'ont qu'une conduction de 0,026, par conséquent, celle voisine de l'air.

La stabilité chimique des matières plastiques est un avantage précieux dans la construction. Cette propriété est due à la stabilité chimique des polymères et des charges employés dans la fabrication des matières plastiques.

La stabilité chimique doit être comprise ici dans son sens large et comprend en particulier la résistance à l'eau, aux solutions salines, et dans de nombreux cas aux dissolvants organiques tels que l'essence, le benzol, etc.

Les matières plastiques à base de polyéthylène, polyisobutylène, polystyrol et chlorure de polyvinyle résistent particulièrement bien aux acides et aux solutions salines.

On peut mettre à profit la stabilité chimique de nombreuses matières plastiques pour fabriquer les éléments des canalisations, ainsi que l'étanchéité des réservoirs contenant des substances agressives.

La coloration dans la masse est un avantage important des matières plastiques car elle supprime la peinture périodique, nécessaire à de nombreux autres matériaux de construction, qui accroît les frais d'entretien de ces matériaux.

D'autre part, la forte résistance des matières plastiques à la corrosion permet également de supprimer les travaux périodiques de peinture. La possibilité de donner à la surface des pièces en matière plastique une forte compacité et de les rendre très lisses au cours du moulage contribue également à cette résistance.

La forte résistance des matières plastiques à l'abrasion présente également un grand intérêt. A ce point de vue, les matières plastiques sont tout indiquées pour les sols.

La transparence et les excellentes qualités optiques sont des avantages très précieux de certaines matières plastiques simples, c'est-à-dire celles qui ne contiennent pas de charges. Les matières plastiques transparentes peuvent avantageusement remplacer le verre à vitres à condition de réduire leur prix de revient.

Les verres organiques se laissent facilement colorer en diverses couleurs. Il faut signaler leur masse volumique peu élevée. Par exemple, un verre en polystyrol a une masse volumique de 1 060 kg/m^3, alors que celle du verre à vitres ordinaire est de 2 500 kg/m^3.

Les verres organiques sont plus faciles à mouler que le verre ordinaire, la matière plastique ne devant pas être chauffée jusqu'à une température élevée. En outre, le développement de l'emploi des verres organiques dans la construction se trouve encore favorisé par leur résistance mécanique suffisamment élevée, et du fait qu'ils ne sont pas fragiles.

Les matières plastiques ont l'avantage d'être faciles à usiner, ce qui permet de leur donner des formes et contours les plus variés. La possibilité de travailler ces matières sans enlèvement de copeaux (par moulage, extrusion, injection) réduit considérablement le prix de revient des pièces.

On peut facilement travailler les matières plastiques sur des machines (sciage, perçage, fraisage, rabotage, tournage, etc.) et de plus on peut utiliser totalement les copeaux et autres déchets. Ce mode de travail des pièces en matière plastique est donc parfaitement rationnel au point de vue technique et économique.

Les pièces en matière plastique peuvent être collées soit entre elles soit sur d'autres matières, par exemple sur du métal, du bois, etc. Les matières plastiques permettent donc de fabriquer des pièces et structures composites diverses, réalisées par collage.

Il est facile de souder les matières plastiques (par exemple, on soude des tubes dans un jet d'air chaud). Cela permet de mécaniser les travaux de montage des équipements sanitaires réalisés avec ces matières.

La facilité de rendre les joints et autres assemblages de pièces en matière plastique étanches permet d'employer largement ces pièces comme éléments d'étanchéité à l'eau et au gaz. Cette propriété est particulièrement précieuse en association avec celle que possède la matière plastique de donner des minces films résistants étanches au gaz et à l'eau pouvant être largement utilisés comme étanchéité sûre, bon marché et pratique.

En outre, la possibilité d'obtenir des films minces en matière plastique et de les coller énergiquement sur de nombreux matériaux fait des matières plastiques une matière première irremplaçable pour la fabrication des vernis et des peintures.

Parmi les nombreux avantages des matières plastiques considérées comme matériau de construction, il faut encore signaler que les matières premières pour fabrication des polymères sont pratiquement illimitées et facilement accessibles.

Les r é s i n e s s y n t h é t i q u e s, vers lesquelles s'oriente l'évolution de l'industrie soviétique des matières plastiques, sont obtenues par voie de transformation chimique sur la base des réactions de polycondensation et de polymérisation des substances chimiques élémentaires. On obtient

ces dernières à partir de matières naturelles aussi facilement accessibles que le charbon, la chaux, l'air, les pétroles, etc.

Pour donner une image complète des matières plastiques en tant que matériau de construction, il faut aussi mentionner quelques-uns de leurs défauts.

Avant tout, leur température limite de résistance à la chaleur est faible (de +70 à +200 °C). Il est vrai que dans le bâtiment ce défaut n'est grave que quand cette limite est à son point le plus bas. Ceci est particulièrement important pour les matériaux de couverture à base de matière plastique. En effet, sous l'action du rayonnement solaire, la température des toitures peut atteindre 85 °C dans certaines régions géographiques.

La faible dureté superficielle est un défaut essentiel des matières plastiques. Cette dureté atteint 25 kg/mm^2 pour les agglomérés, et environ 15 kg/mm^2 pour les polystyrols et matières acryliques. A titre de comparaison, la même caractéristique pour l'acier est environ 450 kg/mm^2.

Le coefficient élevé de dilatation thermique des matières plastiques, un autre défaut de ces matières. Ce coefficient varie de 25 — 120 $\times$ 10^{-6}. Il est donc 2,5 à 10 fois plus élevé que celui de l'acier. Il faut tenir compte de cette valeur élevée du coefficient de dilatation thermique des matières plastiques dans les calculs des éléments structuraux, en particulier de certains éléments de grandes dimensions en matière plastique tels que les panneaux de murs.

Il ne faut pas non plus négliger un autre inconvénient des matières plastiques — leur faible résistance au fluage. Même les matières plastiques dures qui contiennent une charge minérale pulvérulente subissent un fluage lent, qui augmente fortement même en présence d'une faible hausse de la température.

Enfin, un inconvénient essentiel des matières plastiques est leur combustibilité.

§ 2. RÉSINES POLYMÈRES

Les résines polymères, formées par combinaison de nombreuses molécules identiques dont la structure n'est pas modifiée sensiblement au cours de cette transformation, sont très nombreuses. De plus, leur nombre augmente sans cesse grâce aux découvertes de nouvelles matières de ce genre. Par contre, le nombre des résines polymères employées

pour fabriquer des matériaux de construction est très faible.

D'après la classification actuelle, les résines à poids moléculaire élevé sont divisées en quatre classes, selon leur procédé de fabrication :

A — polymérisation,

B — polycondensation,

C — modifications de polymères naturels,

D — en conditions naturelles, ou par distillation de substances organiques (distillation simple ou distillation destructrice).

Les résines du dernier groupe (D) constituent les bitumes naturels et bitumes à pétrole, les goudrons de houille, la poix, les huiles, etc., c'est-à-dire les matières premières servant à fabriquer ce qu'on appelle les *matériaux de construction bitumineux*. Ces matières ne sont pas considérées comme faisant partie des polymères.

Nous ne les examinerons pas dans le présent chapitre, car elles jouent un rôle insignifiant dans l'évolution de l'industrie des matières plastiques actuelle. Le chapitre XI de ce manuel leur a été par ailleurs consacré.

Les résines de la classe C, obtenues par modification ou transformation des polymères naturels, ne sont que très peu employées dans le bâtiment (dans l'industrie des vernis et peintures). C'est pour cette raison qu'elles ne seront pas examinées dans ce manuel abrégé.

L'évolution de l'industrie des matériaux de construction à base de matières plastiques actuelle repose sur l'emploi des résines synthétiques, c'est-à-dire des résines des groupes A et B que l'on obtient par polymérisation et par polycondensation.

La polymérisation est une réaction qui consiste à associer plusieurs molécules non saturées (monomères) d'une même substance, ce qui donne naissance à une nouvelle substance, le polymère, sans élimination de sous-produits de la réaction. Le poids moléculaire du polymère est égal à la somme des poids moléculaires des molécules en réaction.

Dans une réaction de condensation, la composition élémentaire des polymères obtenus diffère de la composition des matières initiales car la réaction de polycondensation est accompagnée de l'élimination de produits extrêmement simples tels que l'eau, l'ammoniac, etc.

Les diverses résines polymères se comportent différemment quand on les chauffe. Les molécules ayant une struc-

ture linéaire peuvent se ramollir au chauffage et durcir au refroidissement (*résines thermoplastiques*).

Les résines ayant une structure moléculaire à trois dimensions ne peuvent pas se ramollir et durcir d'une façon réversible. Ce sont les *résines thermoréactives*.

Nous examinerons ci-après brièvement les principales de ces résines.

a) Résines de polymérisation

Polyéthylène

La formule du polyéthylène est :

$$[-CH_2-CH_2-CH_2-]n$$

On obtient le polyéthylène par polymérisation de l'éthylène. Cette matière plastique est relativement nouvelle. Sa synthèse a été faite en Angleterre en 1937, et elle n'a trouvé son application technique que pendant la deuxième guerre mondiale.

Le polyéthylène a une bonne résistance ou stabilité chimique, une bonne résistance mécanique (100 à 200 kg/cm^2 à la rupture), une bonne résistance à la gelée, une faible perméabilité aux gaz, une faible absorption d'eau et une faible masse volumique. L'ensemble de ces propriétés font du polyéthylène un matériau irremplaçable dans de nombreux secteurs techniques, et en particulier dans la technique du bâtiment.

Nous indiquerons ci-après brièvement le procédé de fabrication du polyéthylène sous haute pression, actuellement le plus répandu.

La matière première servant à la fabrication du polyéthylène — l'éthylène industriel contient diverses impuretés et peut être obtenu à des concentrations différentes.

La formule de l'éthylène est :

$$CH_2=CH_2$$

L'éthylène est un gaz incolore qui a une faible odeur d'éther. Il brûle avec une flamme claire.

Le procédé actuel de fabrication industrielle de l'éthylène consiste à l'éliminer par voie de refroidissement poussé des mélanges gazeux formés par la dissociation (cracking) des pétroles bruts.

Pour effectuer la polymérisation, on emploie un éthylène fortement concentré et soigneusement épuré, et en particulier débarrassé de toute trace d'acétylène C_2H_2.

Avant d'entreprendre la polymérisation, on ajoute à l'éthylène une proportion rigoureusement déterminée d'oxygène (0,05 à 0,1 %), qui a pour but de déclencher le processus.

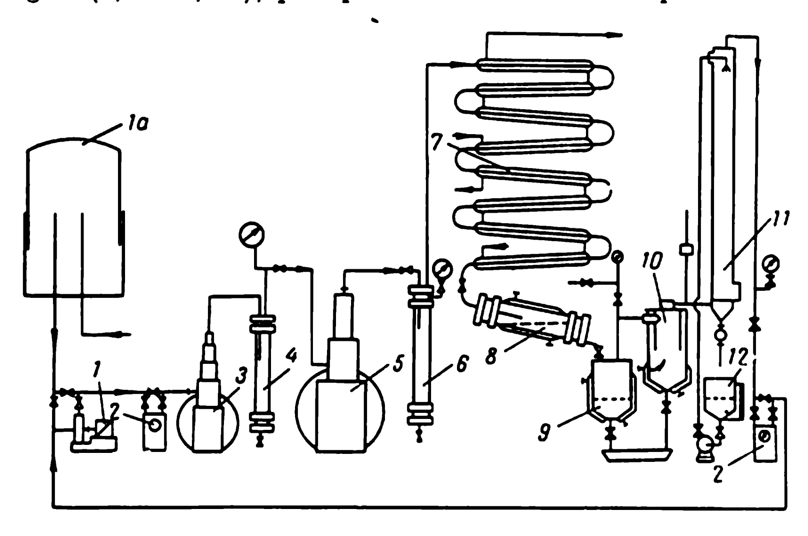


Fig. 137. Schéma de la fabrication du polyéthylène :
1 — pompe ; 1a — gazomètre ; 2 — compteur à gaz; 3 — compresseur (300 kg/cm²); 4, 6 — séparateurs d'huile; 5—compresseur (2 500 kg/cm²); 7—réacteur; 8 — réservoir récepteur sous haute pression; 9 — réservoir récepteur sous basse pression; 10 — piège à polyéthylène ; 11 — épurateur pour lavage de l'éthylène ; 12 — collecteur de la solution basique

La figure 137 représente le procédé de fabrication continue du polyéthylène.

Le mélange gazeux préparé en provenance du gazomètre *1a* est envoyé par la pompe *1* dans le compresseur *3*, après passage par le compteur à gaz *2*.

Le compresseur comprime le gaz sous une pression de 300 kg/cm², et l'envoie à travers le séparateur d'huile *4* dans un deuxième compresseur *5*, où le mélange est porté à la pression nécessaire, qui est de 1 200 à 2 500 kg/cm². Le gaz sous cette pression traverse le séparateur d'huile *6*, et arrive dans le réacteur tubulaire *7*.

Le réacteur est constitué par un serpentin dont la partie intérieure a un diamètre de 10 mm, et dont la partie

extérieure comprend des tubes de 24 mm de diamètre. Les tubes de la première partie sont munis d'une chemise dans laquelle circule de l'eau chauffée à 200 °C pour réchauffer le gaz. Les tubes de la deuxième partie comportent une chemise dans laquelle circule de l'eau à une température inférieure à 100 °C. L'excédent de chaleur produite au cours de la polymérisation est évacué à l'aide de cette eau. La première partie du serpentin ne sert qu'à réchauffer le gaz ; la polymérisation proprement dite, qui se déroule avec dégagement de chaleur, a lieu dans la deuxième partie.

Le polymère et l'éthylène qui n'a pas réagi sortent du réacteur, traversent une soupape de détente et passent dans le réservoir récepteur sous haute pression *8*, puis dans le réservoir *9*, où ils sont détendus jusqu'à la pression atmosphérique. L'éthylène est ensuite envoyé, à travers le piège *10*, dans l'épurateur *11* où il subit un traitement de lavage. Le polyéthylène en provenance du réservoir *9* s'écoule dans les moules où il se refroidit.

Avant l'arrivée du gaz dans l'épurateur, on envoie dans celui-ci une certaine quantité supplémentaire d'oxygène car la polymérisation consomme de l'oxygène. Après lavage avec une solution basique venue dans l'épurateur du collecteur *12*, le gaz retourne dans le gazomètre *1a*, pour participer de nouveau à la fabrication.

Le polyéthylène sous haute pression, produit solide blanc jaunâtre, de la consistance de la corne, est un des polymères les plus légers (densité 0,92 à 0,95).

De même que pour les autres polymères, les propriétés physiques du polyéthylène dépendent du degré de sa polymérisation. Le polyéthylène à poids moléculaire élevé a une température de fusion d'environ 115 °C. Il n'est pas soluble à froid. A des températures supérieures à +80 °C, il commence à se dissoudre sensiblement dans le tétrachlorure de carbone, le trichloréthylène, le benzol et le toluène.

On distingue quatre marques ou qualités de polyéthylène, d'après l'allongement relatif à la rupture, exprimé en pourcentage de la longueur initiale de l'éprouvette : ПЭ-150, ПЭ-300, ПЭ-450 et ПЭ-500.

Actuellement, on emploie le polyéthylène pour fabriquer des pellicules d'épaisseurs diverses, en vue d'assurer l'étanchéité des éléments structuraux, des tubes et des tuyaux à l'égard de l'eau, de la vapeur et des gaz.

Chlorure de polyvinyle

Le chlorure de polyvinyle, que nous appellerons d'une façon abrégée le PVC est l'une des matières plastiques les plus employées dans la technique. On l'obtient par polymérisation du chlorure de vinyle.

Le monomère, c'est-à-dire le chlorure de vinyle $CH_2 = CHCl$, est un gaz incolore ayant l'odeur de l'éther à température et sous pression normales.

Industriellement, on peut obtenir le chlorure de vinyle par l'action de l'acétylène sur l'acide chlorhydrique :

$$CH \equiv CH + HCl \rightarrow CH_2 = CHCl + 447 \text{ cal.}$$

La méthode de fabrication continue par émulsion dans l'eau est la méthode principale de polymérisation du chlorure de vinyle.

L'appareillage utilisé dans cette méthode est constitué par un autoclave de polymérisation en acier inoxydable. L'autoclave est entouré d'une chemise pour le réchauffage à l'eau chaude (50 à 60 °C) et pour le refroidissement soit par circulation d'eau froide, soit par une saumure d'une température de —20 °C.

L'autoclave contient un mélangeur à palettes.

La figure 138 représente schématiquement le fonctionnement de l'autoclave. La solution de la substance initiatrice est envoyée sous la pression de l'azote dans le doseur de distribution *1* d'où elle est refoulée par la pompe *2* dans l'autoclave *6*. Le chlorure de vinyle et la solution de la substance émulsionnante passent par une balance automatique *4*. Cette balance est reliée à des enregistreurs *5* qui commandent des membranes actionnant elles-mêmes les soupapes *3*. Le polymère, constitué par une émulsion fine ou latex, s'écoule en continu de l'autoclave par en bas et arrive sur le filtre horizontal *7* où il se sépare des grosses particules. L'émulsion obtenue est envoyée à la coagulation (sédimentation), au lavage, au filtrage et au séchage.

On produit généralement le PVC sous forme d'une poudre blanche d'une densité de 1,4.

Le PVC commence à se décomposer sensiblement à partir de 140 °C avec dégagement d'acide chlorhydrique, l'acide accélérant la décomposition du polymère. Celui-ci prend une couleur foncée.

On appelle *stabilisants* les adjuvants introduits dans la composition des PVC en vue de fixer l'acide chlorhydrique dégagé au cours du calandrage ou du moulage par compression du PVC et d'accroître la résistance de ce produit à la

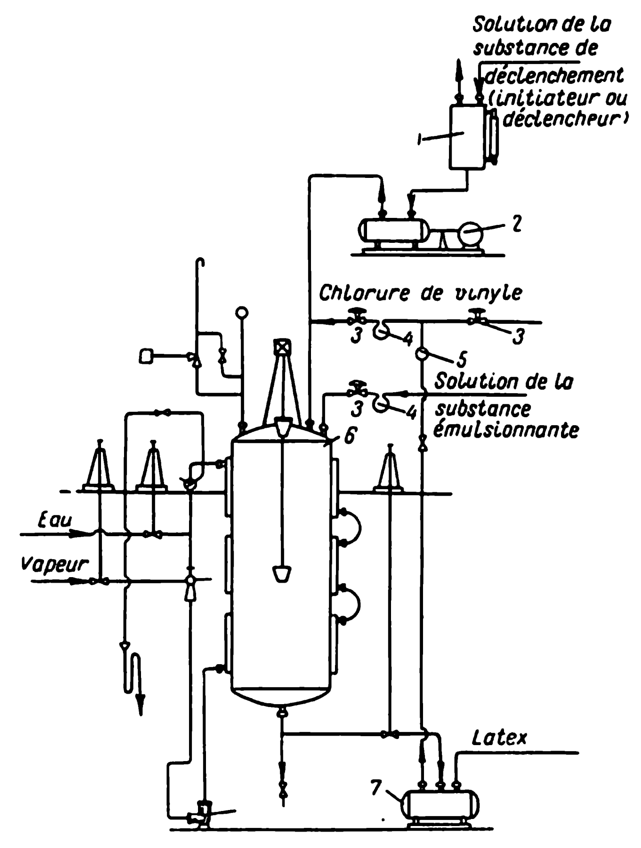


Fig. 138. Fabrication du PVC par voie d'émulsion

chaleur. Les stabilisants peuvent être diverses substances de nature basique, par exemple le carbonate de sodium, le carbonate de plomb, etc.

Le PVC a une résistance mécanique élevée : sa charge de rupture à la traction atteint 500 kg/cm², sa résistance aux chocs 100 kg·cm/cm², et sa résistance à la chaleur est de 65 ° Martens.

Dans le bâtiment, on emploie le PVC pour fabriquer le linoléum recouvrant les sols, le linkrust (linoléum à base de papier servant au revêtement des murs intérieurs). Il sert également à fabriquer les feuilles d'étanchéité ainsi que les gaines de ventilation. Par extrusion (expulsion sous pression par une filière), le PVC permet également d'obtenir des profilés de toute configuration (plinthes, mains courantes, couvre-joints, moulures).

Le PVC permet encore de fabriquer des tuyauteries, des gouttières, ainsi que des raccords correspondants, quand ces pièces ne sont pas exposées à la corrosion.

Polyisobutylène

Le polyisobutylène est une matière élastique d'apparence caoutchouteuse. C'est une matière synthétique à poids moléculaire élevé, obtenue par polymérisation de l'isobutylène.

L'isobutylène $CH_2 = C(CH_3)_2$ est un gaz incolore, qui bout à —6, 9 °C. Industriellement, on l'obtient par extraction soit des gaz de cracking au naturel soit des gaz de cockerie.

La réaction produisant le polyisobutylène à poids moléculaire élevé s'effectue à des températures d'environ —100 °C en présence de dissolvants. Les catalyseurs sont diverses combinaisons halogénées : le trifluorure de bore BF_3, le trichlorure d'aluminium $AlCl_3$, le tétrachlorure de titane $TiCl_4$, etc. Le trifluorure de bore accélère plus fortement la réaction. Si l'on ajoute seulement 0,5% de ce catalyseur (en poids), la vitesse de polymérisation de l'isobutylène se rapproche de celle d'une explosion. Cette réaction s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur, ce qui rend difficile l'évacuation de cette chaleur au cours du phénomène. Aussi, dans la pratique, on effectue la polymérisation dans des dissolvants.

Les polyisobutylènes durs et élastiques comme le caoutchouc que l'on obtient à basse température, sont extrêmement instables. Il faut les stabiliser pour éviter leur destruction. Les stabilisateurs employés sont diverses combinaisons organiques complexes.

On emploie surtout dans la technique les polyisobutylènes hauts polymères durs, dont le poids moléculaire moyen est compris entre 100 000 et 500 000.

Les polyisobutylènes possèdent certaines propriétés extrêmement avantageuses. En particulier, ils résistent bien

aux milieux agressifs et en particulier aux acides chlorhydrique, sulfurique, phosphorique et acétique, ainsi qu'aux bases et aux sels halogénés.

La résistance des polyisobutylènes à l'eau présente un grand intérêt dans le bâtiment. La possibilité d'intégrer des charges de toutes sortes est une autre propriété intéressante de cette substance. La proportion des charges peut atteindre 90%.

On peut utiliser des feuilles de polyisobutylène comme isolation dans les fondations, comme revêtement des sols, et pour constituer des membranes d'étanchéité.

Polystyrène

Le polystyrène est l'une des matières plastiques que l'on connaît depuis le plus longtemps et le mieux. Ses propriétés remarquables telles que par exemple sa résistance à l'eau presque absolue, sa résistance chimique élevée et sa transparence sont bien connues.

La matière première servant à la fabrication du polystyrène est le styrène. Le styrène est un liquide incolore qui bout à 145 °C. Il n'est pas soluble dans l'eau, mais il est soluble dans l'alcool, l'éther et certains autres dissolvants organiques.

On obtient le polystyrène par polymérisation du styrène qui polymérise naturellement mais lentement. Quand on chauffe, la polymérisation est rapide.

Dans l'industrie, on obtient le styrène par déshydratation des vapeurs d'éthylbenzène.

Pour éviter la polymérisation en cours de conservation ou de transport du styrène, on ajoute à celui-ci jusqu'à 3% d'hydroquinone.

La méthode de préparation la plus répandue est la *méthode de polymérisation continue du styrène.* Cette méthode permet en effet d'obtenir un haut polymère complètement exempt du monomère. La polymérisation continue s'effectue dans une installation appelée tour ou colonne. La figure 139 montre schématiquement la polymérisation continue du styrène par échelons successifs.

L'installation comprend deux réacteurs *1* en aluminium, chacun d'une capacité d'environ 2 m^3, et une colonne *2* en acier chrome-nickel. Les réacteurs sont dotés de serpentins dans lesquels circule l'eau de refroidissement et d'agitateurs

à palettes. L'eau enlève une partie de la chaleur formée par la réaction exothermique. On obtient ainsi une température constante d'environ 80 °C dans les réacteurs.

A la température de 80 °C, les réacteurs ne sont le siège que d'une polymérisation préliminaire du styrène. La polymérisation définitive a lieu dans la colonne *2*, où l'on envoie en continu un mélange du monomère et du polymère provenant des réacteurs *1*. La colonne de polymérisation est constituée par 6 enveloppes cylindriques. L'enveloppe supérieure n'a qu'une chemise de réchauffage. Les autres possèdent en outre des serpentins. On établit dans chacune de ces enveloppes un régime thermique particulier.

La masse de styrène séjourne dans la colonne pendant 25 à 30 heures. Dans les réacteurs, elle séjourne environ 60 heures.

On alimente constamment les réacteurs de polymérisation préliminaire et la colonne en azote afin d'empêcher le styrène d'être oxydé par l'oxygène de l'air. Le polymère fondu s'écoule dans la partie inférieure conique de la colonne. Il débouche en continu de la colonne à une température de 200 à 210 °C et passe dans la vis *3* qui l'envoie dans le réfrigérant à air *4*, d'où il est véhiculé vers les magasins.

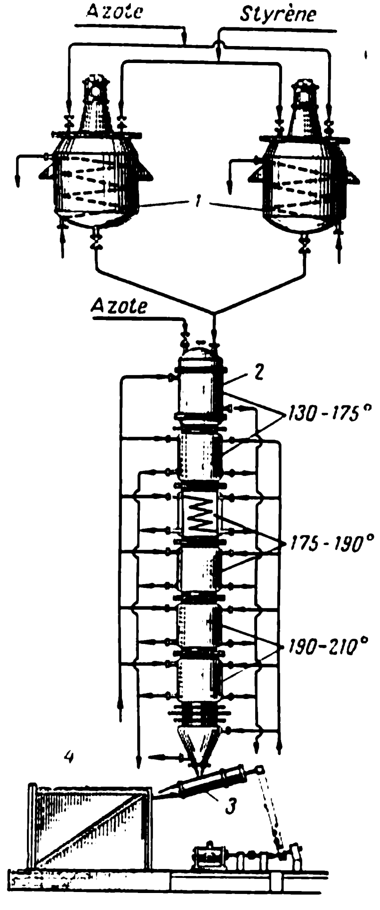


Fig. 139. Méthode continue de polymérisation du styrène

La polymérisation du styrène par *émulsion aqueuse* est une *autre méthode* très employée pour obtenir le polystyrène.

A la température ordinaire, le polystyrène est une matière solide, élastique, de densité 1,05. Sa résistance à la chaleur est de 70 à 80 ° Martens.

Le polystyrène est essentiellement transformé par moulage par compression, car il possède une fluidité très élevée. A cet effet, on emploie le polystyrène sous forme de poudre ou de granulés. On effectue le moulage à une température de 180 à 230 °C, et sous une pression de 500 à 2 000 kg/cm^2.

Outre le moulage par compression, on utilise largement l'extrusion, par exemple pour obtenir des pellicules.

Dans le bâtiment, on utilise le polystyrène dans les matériaux suivants : carreaux colorés de revêtement pour les murs des toilettes, cuisines, hôpitaux ; plaques poreuses pour calorifugeage et insonorisation (poroplastes) ; couleurs et émaux au latex pour travaux intérieurs du second œuvre.

Parmi les défauts du polystyrène en tant que matériau de construction on peut citer sa fragilité, sa faible résistance aux chocs et aux agents atmosphériques.

Acétate de polyvinyle

L'acétate de polyvinyle est un polymère de l'acétate de vinyle $CH_2 = CHOCOCH_3$.

L'acétate de vinyle est un liquide fluide et incolore, de masse volumique 1,191, qui a une odeur d'éther. Il gonfle légèrement dans l'eau et résiste mal aux acides et bases.

L'acétate de vinyle résulte de la combinaison de l'acide acétique avec l'acétylène :

$$CH \equiv CH + CH_3COOH \longrightarrow CH_2{-}CHOCOCH_3 + 28{,}7 \text{ cal.}$$

On polymérise l'acétate de vinyle en présence de substances dites initiatrices ou déclencheurs, qui sont des peroxydes organiques ou minéraux.

On emploie trois méthodes principales pour polymériser cette substance : par dissolution, par émulsion et par échelons successifs.

La méthode de dissolution est la plus répandue. Néanmoins, la méthode d'émulsion a de l'importance dans la fabrication des pièces de construction en acétate de polyvinyle.

On emploie l'acétate de polyvinyle pour fabriquer les vernis. Il est en effet très avantageux grâce à ses excellentes propriétés d'adhérence, sa plasticité, la stabilité de ses couleurs, ainsi que par le fait qu'il est lui-même incolore.

Ses excellentes propriétés de collage permettent de l'employer pour coller les bois. Sous forme d'émulsion, on l'emploie pour les sols au mastic qui ne sont pas exposés à l'humidité, ainsi que pour préparer les bétons de polymères.

Résistant mal à la chaleur, au gel et à l'eau, il ne convient que pour certains travaux de finition (papiers peints lavables, peinture intérieure).

Polyacrylates

Les polyacrylates constituent un groupe étendu et varié de résines de polymérisation, qui a pris actuellement une grande importance technique.

Toutes ces résines sont incolores et transparentes et résistent bien à la lumière.

Les verres durs et souples (plexiglas) présentent un intérêt considérable dans la construction.

L'acide acrylique $CH_2 = CH - COOH$ est un liquide incolore à odeur pénétrante, dont la température d'ébullition est 141 °C. En présence de peroxydes organiques ou minéraux, la polymérisation de cet acide se déroule facilement à une température inférieure à 100 °C.

Les polymères de l'acide acrylique, ainsi que ceux de l'acide métacrylique $CH_2 = C(CH_3)COOH$, n'ont qu'une faible importance pratique, comparativement aux polyesters.

L'acide métacrylique est un liquide qui a une température d'ébullition de 161 °C, une densité de 1,015 et a une odeur moins pénétrante que l'acide acrylique.

On emploie trois procédés principaux de polymérisation : par dissolution, par émulsion aqueuse et par échelons successifs.

On emploie la méthode par échelons successifs pour fabriquer le polyméthylmétacrylate, que l'on obtient alors en plaques ou blocs transparents et incolores (verre organique).

On obtient les blocs de polyméthylmétacrylate en mélangeant soigneusement la substance initiatrice (peroxyde de benzoyle) avec le monomère, et en versant ensuite le mélange dans des moules en verre.

La polymérisation une fois terminée, on immerge le moule dans l'eau, après quoi les blocs peuvent être aisément séparés du verre. Les pièces ainsi obtenues (blocs ou feuilles) sont ensuite ébarbées sur les bords et polies. On fabrique

des feuilles de verre en polyméthylmétacrylate de 0,5 à 50 mm d'épaisseur et même davantage.

Les polyesters métacryliques résistent mieux à la chaleur que les polyesters acryliques. La différence entre les polymères métacryliques et les polymères acryliques consiste en ce que les premiers résistent mieux que les derniers aux agents chimiques et à l'eau.

Les propriétés particulièrement avantageuses des polyacrylates, au point de vue technique, consistent en ce que ces corps sont transparents, incolores, et laissent passer les rayons ultraviolets. Par exemple, le polyméthylmétacrylate laisse passer plus de 99% de la lumière solaire et 73,5% des rayons ultraviolets. A ce point de vue, cette substance est très supérieure aux verres de silicate. Les glaces de silicate ne laissent passer que 3% de ces rayons, et les verres ordinaires de silicate que 0,6%.

Par contre, comparativement aux verres de silicate, les verres organiques ont une plus faible dureté superficielle et résistent moins bien à l'abrasion. Ils ont le grand avantage de pouvoir être travaillés mécaniquement (rabotage) ou par voie de déformation plastique.

On fabrique les grosses pièces de forme sphérique, en partant de feuilles de verre organique, par la méthode de formage, de préférence sous vide.

On fabrique les tubes et autres pièces creuses par centrifugation d'une masse plus ou moins fluide, obtenue par dissolution du polymère dans le monomère.

Le polyméthylmétacrylate est très employé dans divers secteurs techniques, et tend à être de plus en plus employé dans le bâtiment. On peut l'employer pour les vitrages de divers édifices, en particulier pour les serres dans la construction agricole. Sous forme de feuilles il peut constituer des enceintes ou enveloppes décoratives. On l'utilise pour la quincaillerie des portes et fenêtres, pour la fabrication de papiers peints lavables et comme émulsions pour préparer les couleurs et les couches de fond.

b) Résines de polycondensation

Résines phénol-aldéhyde

Comme l'indique le nom de ces résines on peut les obtenir en faisant réagir des phénols sur des aldéhydes par polycondensation.

Parmi les aldéhydes, on peut employer par exemple le formaldéhyde, le furfural, l'aniline, la lignine. On obtient ainsi des résines phénol-formaldéhyde, phénol-furfural, phénol-lignine, etc.

La réaction entre les phénols et les aldéhydes est une réaction de polycondensation dont le déroulement nécessite des molécules réagissantes à fonctions multiples.

Suivant le nombre des fonctions multiples (ou nombre des points de réaction) du phénol employé comme matière première, la nature de l'aldéhyde, les proportions relatives entre aldéhyde et phénol et le catalyseur employé, on peut obtenir deux groupes de produits de polycondensation : les produits thermoréactifs et les produits thermoplastiques.

Les *résines thermodurcissables* peuvent, par chauffage, passer à l'état infusible et insoluble (dans les polymères à trois dimensions).

Les *résines thermoplastiques* sont constamment fusibles et solubles, et ne sont pas transformées par le chauffage.

Dans leur état initial, c'est-à-dire à l'état fusible et soluble, les résines thermodurcissables sont appelées résols ou résines au stade A.

Les résols sont des produits de réaction instables. En fonction de la température, ils se transforment plus ou moins rapidement, pour passer à l'état final, c'est-à-dire infusible et insoluble. Le passage à l'état de transformation totale et d'insolubilité est précédé d'un stade de passage à l'état intermédiaire, caractérisé par la perte de la fusibilité et de la solubilité (stade B).

Le stade final de polycondensation est caractérisé par l'insolubilité de la résine, par son incapacité de se ramollir au chauffage et de gonfler dans les dissolvants. A ce stade, les résines sont appelées *résites* ou encore résines au stade C.

Les résines thermoplastiques sont connues sous le nom de novolaques.

Les matières premières de la fabrication des résines phénol-formaldéhyde sont le phénol C_6H_5OH et la formaline CH_2O (aldéhyde formique, appelé aussi formol).

Le procédé de fabrication des résines phénol-formaldéhyde comprend les opérations principales suivantes : préparation de la matière première, chargement dans la chaudière de cuisson, cuisson, séchage et coulée.

Pour effectuer la polycondensation, on prend 26,5 à 27,5 g de formaline pour 100 g de phénol.

La polycondensation se fait sous vide, dans la chaudière de cuisson.

La chaudière (fig. 140) est un cylindre *1* en acier, entouré d'une chemise où circule la vapeur, et doté d'un couvercle bombé et d'un fond. La chaudière contient un mélangeur *2*, entraîné par un moteur électrique *3*. La partie basse de la

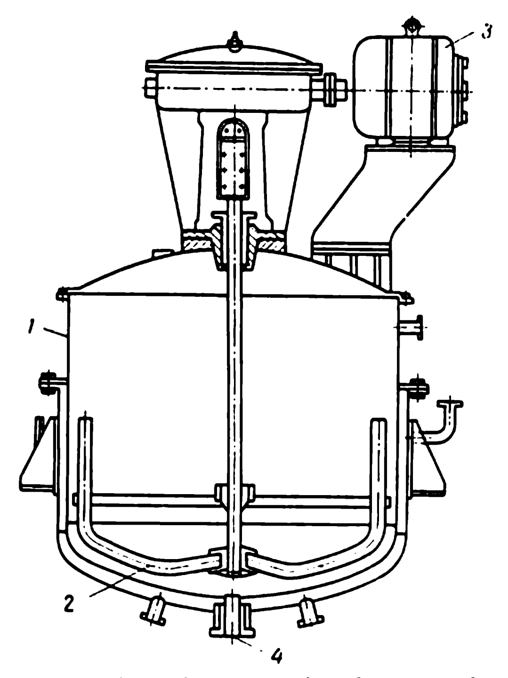


Fig. 140. Chaudière de cuisson à vide pour préparation de résines par polycondensation :

1 — cylindre en acier avec couvercle et fond ; *2* — mélangeur ; *3* — moteur électrique ; *4* — robinet d'évacuation de la résine

chaudière comporte un robinet *4* servant à évacuer la résine. Le couvercle comporte deux regards et une ouverture permettant de nettoyer la chaudière. La capacité de ces chaudières varie de 1,5 à 10 m³.

La matière première préparée est pompée dans la chaudière de cuisson en même temps qu'une faible quantité de catalyseur (acide chlorhydrique ou acide oxalique). Le mélange une fois bien brassé, on admet la vapeur dans la chemise.

On chauffe ainsi le mélange, et on le maintient à l'état d'ébullition. La cuisson dure 2 ou 2 heures et demie. Il se forme d'abord une émulsion constituée par l'eau flottant sur la résine, par la résine et par des résidus de phénol et de formaline qui n'ont pas réagi. Ensuite, le mélange se sépare en deux couches, une couche inférieure de résine et une couche supérieure d'eau.

On arrête parfois l'opération au stade de l'émulsion et l'on emploie la résine sous cette forme pour obtenir des poudres pressées (frittées) ou une colle résistant à l'eau. Dans la plupart des cas, on sèche la résine dans la chaudière même, sous vide ; dans cet état desséché et fondu, on la déverse sur des caissons métalliques, où elle durcit en se refroidissant. Dans cet état, une résine novolaque peut se conserver pendant longtemps sans que ses propriétés se modifient. En cours de conservation, un résol peut durcir progressivement et perdre sa fusibilité.

Un résol peut se transformer en un polymère à réseau tridimensionnel et passer ainsi progressivement à l'état d'une résite.

Dans les constructions, on emploie les résines phénol-formaldéhyde pour préparer des colles, des panneaux dures en fibre de bois et en particules de bois agglomérées, des plastiques stratifiés fibreux, du contre-plaqué résistant à l'eau, des plastiques stratifiés contenant du papier, des plastiques alvéolaires, des paillasses en laine minérale et en laine de verre et des vernis à l'alcool.

La deuxième catégorie dans ce groupe est constituée par les *résines phénol-furfural*. On obtient ces résines par condensation (sous pression et en autoclave) d'un phénol et du furfural. Ce dernier remplace le formaldéhyde dans la réaction.

Le *furfural* ($C_5H_4O_2$) est un produit qu'on obtient en partant des épis de maïs, des écales d'arachide et de quelques autres déchets agricoles. Il se présente sous forme d'un liquide incolore, qui prend une couleur foncée par exposition à l'air, et qui bout à 162 °C.

Les résines de furfural ont certains avantages sur les phénols-formaldéhydes. Elles s'imprègnent mieux de la charge et donnent des pièces moulées sous pression qui ont une couleur plus uniforme et un meilleur aspect.

Les résines de furfural ont également l'avantage de former des poudres frittées plus fluides, ce qui permet de mieux

remplir les moules. Cet avantage est particulièrement important quand on doit réaliser par pression les pièces de grandes dimensions et de forme compliquée, c'est-à-dire dans les cas où l'on a besoin d'une fluidité élevée au cours du remplissage du moule et du formage de la pièce. Cette dernière propriété est particulièrement importante dans la fabrication des éléments de construction de grandes dimensions.

Résines résorcine-formaldéhyde

On obtient ces résines en condensant la résorcine avec le formaldéhyde.

La résorcine $C_6H_4(OH)_2$ se présente sous forme de cristaux incolores facilement solubles dans l'eau et dans l'alcool.

On peut obtenir la matière de pressage en cylindrant directement à 70-75 °C un mélange de résorcine, de paraformaldéhyde (appelé quelquefois paraforme) avec une charge (sciure de bois par exemple). Après ce cylindrage on broie la masse et on la comprime dans des moules de formage à chaud.

On prépare les produits stratifiés en imprégnant des feuilles de papier ou de tissu avec une solution aqueuse d'urotropine, par leur séchage et leur seconde imprégnation avec une solution aqueuse de résorcine. Après séchage, les feuilles pressées à chaud forment une matière plastique dure et infusible. La réaction de polycondensation avec formation d'un polymère à trois dimensions se déroule dans ces cas essentiellement au cours du pressage à chaud.

A l'état durci les résines de résorcine résistent beaucoup mieux à la chaleur que les phénols-formaldéhydes et sont beaucoup plus dures. En partant de résines de résorcine, on fabrique des matières pressées qui servent à obtenir des pièces de grandes dimensions. Ces matières durcissent à basse pression et à basse température.

Résines carbamide et mélamine-formaldéhyde

Les résines les plus répandues dans la technique, et en particulier dans le bâtiment, sont les résines carbamide (urée-formaldéhyde) et les résines mélamine-formaldéhyde.

A la différence des pièces en phénol-formaldéhyde, les pièces réalisées avec des résines carbamide sont incolores ou ont une couleur claire, ce qui est important par exemple

dans la fabrication des éléments de construction du second œuvre.

Les réactions entre l'urée et le formaldéhyde peuvent donner aussi bien des résines thermoplastiques que des résines thermodurcissables. L'un des composants de ces résines, l'urée ou carbamide qui a pour formule $CO(NH_2)_2$, se présente sous forme de cristaux incolores qui se dissolvent bien dans l'eau.

En dehors de l'absence de couleur, les avantages principaux des résines urée-formaldéhyde sur les résines phénol-formaldéhyde sont la résistance à la lumière, la dureté et l'absence de toute odeur. En outre, les résines urée-formaldéhyde sont moins chères que les phénols-formaldéhydes. Toutefois les urées-formaldéhydes sont inférieures aux phénols-formaldéhydes à d'autres points de vue, et en particulier en ce qui concerne la résistance à l'eau, aux acides et à la chaleur. On emploie les résines urée-formaldéhyde principalement pour préparer des matières plastiques (matières plastiques moulées, poudres frittées, etc.), des vernis, des colles et des matières poreuses.

A partir des résines urée-formaldéhyde et des charges stratifiées (papier par exemple), on obtient des *matières plastiques stratifiées*. La résistance mécanique des matières plastiques stratifiées en urée-formaldéhyde à base de tissu, papier ou fibre de verre, est analogue à celle des phénoplastes. Les premières sont supérieures en ce qui concerne la résistance à la lumière, la possibilité de coloration vive, l'absence d'odeur même à haute température, mais elles sont inférieures aux phénoplastes en ce qui concerne la résistance à l'eau et à la chaleur.

Les résines urée-formaldéhyde servent à fabriquer des plaques de revêtement et des panneaux de particules de bois agglomérées. En outre, ces résines permettent de fabriquer des matières plastiques mousses, qui résistent mieux à la chaleur que celles qu'on obtient avec des résines thermoplastiques. Les urées-formaldéhydes sont employées avec succès comme matériaux calorifuges. Par exemple, le *mipor* (résine mousse d'urée-formaldéhyde contenant des sels de phosphore pour ignifugation) est très employé pour l'isolation thermique.

Les résines urée-formaldéhyde sont très employées dans la fabrication des vernis et des émaux, parce qu'elles sont incolores et résistent bien à la lumière. Parmi les pro-

duits les plus économiques, il faut citer les colles à base de résine urée-formaldéhyde. On emploie ces colles de préférence pour coller les pièces en fibre de bois (contre-plaqué), ainsi que les matériaux poreux.

Résines mélamine-formaldéhyde

Les résines mélamine-formaldéhyde ont pris une grande importance dans l'industrie, et leur fabrication se développe de jour en jour. Elles présentent de nombreux avantages sur les résines urée-formaldéhyde : durcissement rapide, dureté élevée, forte résistance à l'eau, aspect brillant, etc.

La mélamine est une combinaison cyclique dont le noyau comprend trois atomes de carbone et trois atomes d'azote. La substance a l'aspect de cristaux prismatiques blancs. La mélamine se dissout mal dans l'eau, mais se dissout relativement bien dans la formaline. C'est pourquoi la réaction se fait en solution de formaline dans la fabrication industrielle.

Les résines mélamine-formaldéhyde sont transparentes, non toxiques, et résistent bien à la lumière. Elles sont plus transparentes, plus dures, et résistent mieux à l'eau et à la chaleur que les urées-formaldéhydes.

On emploie avec succès un mélange de mélamine-formaldéhyde, phénol-formaldéhyde et d'autres polymères en association avec des placages de bois, de la cellulose, du tissu ou du papier dans la fabrication des plaques de revêtement, des pièces architecturales, etc. On emploie également ces mélanges pour obtenir des verres plastiques laminés servant à fabriquer des pièces de grandes dimensions par pressage à basse pression.

On emploie souvent les mélamines-formaldéhydes à l'état de mélange avec d'autres résines, parce qu'elles coûtent beaucoup plus cher que les phénols-formaldéhydes et les urées-formaldéhydes.

Les colles fabriquées avec des résines mélamine-formaldéhyde sont aussi fortes et résistent aussi bien à l'eau que celles que l'on fabrique avec les phénols-formaldéhydes. On fabrique les premières sous forme liquide et sous forme de pâte. On emploie les colles constituées par des mélanges mélamine-urée-formaldéhyde principalement dans l'industrie du bois et du contre-plaqué.

Polyesters

Les polyesters constituent un groupe très intéressant qui sert à fabriquer les matériaux de construction. Parmi ces résines la plus employée dans la technique des constructions est appelée glyphtal ou glyptal. La synthèse se fait par réaction entre la glycérine et l'anhydride phtalique.

La *glycérine* $C_3H_5(OH)_3$ est l'alcool triatomique le plus simple. On peut l'obtenir par hydrolyse d'une graisse quelconque.

L'*anhydride phtalique* $C_6H_4(CO_2)O$ résulte de la perte d'une molécule d'eau par l'acide orthophtalique $C_6H_4(COOH)_2$.

Dans les synthèses techniques, on obtient toujours l'acide phtalique sous la forme de l'anhydride, qui résulte de l'oxydation de la naphtaline. La réaction entre la glycérine et l'anhydride phtalique donne un polymère tridimensionnel à structure réticulaire.

Pendant la fabrication d'un glyptal, il faut chauffer avec précaution et contrôler soigneusement la condensation, car celle-ci s'effectue d'une façon extrêmement compliquée et en plusieurs étapes.

Il est extrêmement difficile d'employer les résines glyptals pures pour constituer les vernis, parce que les pellicules obtenues sont fragiles et résistent mal à l'eau et aux agents atmosphériques. En outre, elles ne sont pas solubles dans les huiles. En faisant réagir ces résines avec des huiles et des acides gras résineux, on obtient des résines élastiques et peu solubles qui résistent bien à l'eau et aux agents atmosphériques.

On emploie principalement les résines glyptals pour préparer les vernis, les émaux, les sous-couches et des matières de remplissage pour les intérieurs. On les emploie également pour fabriquer le linoléum et linkrust de glyptal.

§ 3. PRINCIPAUX MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION À BASE DE POLYMÈRES

a) Matériaux structuraux

Il est proposé actuellement de construire des panneaux sandwiches à trois couches en matières plastiques. Les plastiques de verre et de bois constituent les couches portante

et de protection. Des matières plastiques poreuses ou des matériaux calorifuges à structure cellulaire constituent l'âme alvéolaire (nid d'abeilles).

Plastiques de verre

Les plastiques de verre, association de résines synthétiques et de fibres de verre, sont particulièrement indiqués pour constituer la couche extérieure d'un panneau. La fibre de verre présente d'énormes avantages sur les fibres organiques : forte résistance à la rupture, module d'élasticité élevé, bonne résistance chimique, imputrescibilité, faible hygroscopicité, résistance au feu. Les fibres de verre associées aux résines constituent un excellent matériau armaturé, dont la résistance se trouve accrue par l'adhérence de la résine, qui protège les fibres de verre contre les agents de destruction et qui répartit la contrainte entre ces fibres. On fabrique les plastiques de verre suivants : la textolite de verre et un matériau vitreux, fibreux et anisotrope, appelé en abrégé CBAM.

La *textolite de verre* est un matériau stratifié en feuilles. On l'obtient par pressage à chaud de nappes de tissu de verre et de papier, disposées en couches régulières et imprégnées d'une résine phénol-formaldéhyde ou autre.

Le collage du tissu de verre se fait dans des machines verticales (quelquefois horizontales) d'imprégnation et de séchage. On utilise des solutions d'alcool ou des émulsions aqueuses de résols. Le pressage du tissu se fait dans des presses étagées.

L'industrie fabrique diverses marques ou qualités de plastiques de verre stratifiés. Ces produits diffèrent entre eux par la grosseur des fibres, l'épaisseur du tissu et la proportion de résine polymère.

Les recherches des savants soviétiques ont montré que la résistance d'un fil de verre est maximale immédiatement après sa fabrication, c'est-à-dire après son étirage de la masse. Cette résistance initiale diminue toutefois rapidement sous l'effet de tensions mécaniques très faibles et de l'humidité de l'air. La conservation et la transformation des fils ont donc pour effet de réduire considérablement leur résistance (de la moitié ou des deux tiers).

Cette circonstance a conduit à créer un produit nouveau, le CBAM (A. Bourov et ses collaborateurs). Pour fabriquer

ce produit, on utilise la fibre de verre à sa sortie du four. De cette façon, la chute de résistance de cette fibre est réduite au minimum.

On fabrique le CBAM avec de la fibre de verre et des résines synthétiques. La particularité de la méthode de fabrication est que les fibres de verre sont orientées parallèlement dans la résine, et qu'on les couvre simultanément d'un liant. Cette orientation des fibres donne un produit de verre fibreux, qui est anisotrope tout comme une feuille de placage en bois. C'est pourquoi on appelle quelquefois ce produit « placage de verre ».

Pour fabriquer le placage de verre, on enroule le fil de verre sur un tambour à sa sortie du four. Le four est installé sur un chariot et se déplace le long de l'axe du tambour. La vitesse de rotation du tambour est réglée d'après le diamètre de fil que l'on veut obtenir. Le fil s'enroule sur le tambour en spires parallèles.

En même temps qu'on enroule la fibre sur le tambour, on l'enrobe dans du liant à l'aide d'un appareil pulvérisateur. Ce procédé permet d'obtenir un nombre quelconque de couches, sous forme d'un ruban de placage de verre à fibres parallèles d'épaisseur donnée.

Sur ce même tambour, on peut également réaliser des placages de verre à fibres croisées, dans lesquels chaque couche de fils est disposée perpendiculairement à la précédente. Si l'on soumet un tel placage de verre à un pressage à chaud, on obtient un plastique de verre stratifié en feuilles, que l'on appelle contre-plaqué de verre.

Un CBAM comportant le même nombre de couches longitudinales et transversales possède les caractéristiques mécaniques suivantes : masse volumique 1 900 kg/m^3, résistance à la compression 4 200 kg/cm^2, résistance à la traction 4 800 kg/cm^2 (ce qui est supérieur à la résistance de l'acier nuance 3). Ces caractéristiques permettent d'employer le CBAM dans des éléments sollicités par de fortes charges.

Plastiques stratifiés en bois

Les plastiques stratifiés en bois (ДСП) sont des produits que l'on obtient par pressage à chaud de minces feuilles de placage en bois imprégnées de résine synthétique.

Les résines résols en phénol-formaldéhyde sont les liants les plus employés. On imprègne la feuille de placage en

l'immergeant pendant 40 à 60 mn dans une cuve contenant la résine ou l'émulsion de résol. Ensuite, on la sèche à 60 ou 70 °C. Les feuilles de placage sont pressées à 150-160 °C après séchage dans de puissantes presses à plusieurs étages, pour constituer les plaques.

Les propriétés d'un plastique stratifié en bois dépendent de la qualité de placage, de son épaisseur, de la composition de la résine résol et du procédé de mise en place des feuilles dans le produit pressé. On distingue les marques ou qualités suivantes, d'après la disposition des fibres dans les couches contiguës et la déstination du matériau :

ДСП—А:
ДСП-Б; ДСП—Б-а; ДСП—Б-э; ДСП—Б-м;
ДСП—Б-т;
ДСП—В; ДСП—В-э; ДСП—В-м;
ДСП—Г; ДСП—Г-м.

Les lettres А, Б, etc., qui suivent l'abréviation ДСП, indiquent l'ordre de mise en place des feuilles de placage dans le plastique :

« А » indique que les fibres de bois sont parallèles dans toutes les couches ou que toutes les quatre couches aux fibres parallèles suivent ou précèdent une couche dans laquelle les fibres sont inclinées de 20 ou 25°;

« Б » indique, que de 5 à 20 couches ont des fibres parallèles, et que ces couches suivent ou précèdent une couche dans laquelle les fibres sont perpendiculaires à celles des feuilles contiguës ;

« В » indique que, dans toutes les couches contiguës, les fibres sont orthogonales ;

« Г » indique que, dans deux couches contiguës, les fibres sont alternativement décalées d'un angle de 25 à 30°.

Les dernières lettres а, э, м et т indiquent la destination du matériau.

Les plastiques stratifiés en bois d'une épaisseur inférieure à 15 mm sont appelés plastiques minces, et ceux d'une épaisseur supérieure à 15 mm sont appelés plastiques épais. Le tableau 21 donne les dimensions de ces matériaux plastiques.

On emploie les plastiques stratifiés en bois pour recouvrir les murs extérieurs et pour fabriquer des panneaux de murs. Ils résistent bien aux agents atmosphériques et sont faciles à travailler à la scie, à la fraise, à la perceuse et autres outils.

Tableau 21

Dimensions des plastiques stratifiés en bois

Marque du ДСП	Dimensions nominales en mm		
	Longueur	Largeur	Epaisseur
ДСП-В ДСП-В-э	700, 1100 1500		1,0; 1,5; 2,0 2,5
ДСП-В ДСП-В-э	700, 1100, 1500, 2300, 4800, 5600		3,0; 4,0; 5,0 6,0; 7,0; 8,0 10,0; 12,0
ДСП-А ДСП-Б-м ДСП-В-м	700, 1100, 1500	800, 900 1000, 1100 1200	15-60
ДСП-Б, ДСП-Б-а ДСП-Б-э ДСП-Б-т ДСП-В, ДСП-В-э	700, 1100, 1500, 2300, 4800, 5600		15-60
ДСП-Г ДСП-Г-м	Polygones dont le cercle inscrit a un diamètre compris entre 600 et 1000		15-60

Les caractéristiques physico-mécaniques des plastiques stratifiés en bois varient avec la marque considérée. Leurs valeurs moyennes sont les suivantes : masse volumique 1 250 à 1 280 kg/m^3, résistance limite à la flexion au moins 1 000 kg/cm^2, absorption d'eau maximale en 24 heures 5%.

Panneaux en particules de bois agglomérées

On fabrique ces panneaux en pressant à chaud un mélange soigneusement préparé de copeaux de bois et d'une résine synthétique.

En faisant varier le degré de compression, on obtient des panneaux de poids différents. Le poids détermine le domaine d'emploi de ces panneaux dans la construction.

Les panneaux légers, dont la masse volumique est inférieure à 450 kg/m³, servent de produits calorifuges (voir chap. XIII, § 1).

Pour construire les murs et les cloisons, on emploie des panneaux semi-lourds, dont la masse volumique varie de 450 à 750 kg/m³.

Les panneaux lourds, à masse volumique de 750 à 1 000 kg/m³, et les panneaux ultra-lourds à masse volumique supérieure à 1 000 kg/m³, servent à l'aménagement des sols.

Les liants généralement employés pour fabriquer ces plaques sont des résines thermo-réactives, phénol-formaldéhyde ou carbamide.

Les phénols-formaldéhydes conviennent mieux ici, parce qu'ils durcissent suffisamment vite pendant le pressage à chaud des plaques (à 140 °C). En outre, ces liants donnent des panneaux qui résistent mieux à l'eau que les panneaux obtenus avec les résines carbamide. Par contre, les phénols-formaldéhydes coûtent relativement cher et sont un produit déficitaire.

Les résines carbamide (MФ-17, MФ-20, etc.) coûtent moins cher et sont plus facilement accessibles. Mais il faut leur ajouter un produit durcissant (acide oxalique, chlorure d'ammonium).

On fabrique les panneaux en particules de bois agglomérées par deux procédés : pressage discontinu (périodique) et pressage continu. Le plus répandu est le premier procédé, qui comprend les opérations suivantes :

1) préparation des copeaux ;

2) agglomération des copeaux par collage avec une résine synthétique ;

3) moulage de la masse de copeaux en panneau;

4) premier pressage à froid du panneau à une pression de 5 à 20 kg/cm²;

5) pressage à chaud du panneau dans une presse hydraulique à plusieurs étages, à une température de 120 à 190° et sous une pression de 15 à 35 kg/cm²;

6) repos de la plaque, ébarbage des bords.

Pour les murs et les cloisons, on fabrique des panneaux en particules de bois agglomérées semi-lourds à une couche. Les copeaux doivent avoir une épaisseur de 0,4 à 0,6 mm, une largeur de 6 à 10 mm et une longueur ne dépassant pas 30 mm.

Les copeaux une fois triés et débarrassés de toutes les matières indésirables sont séchés jusqu'à une humidité de 7 à 8% dans des essoreuses à tambour ou à ruban, puis chargés dans les mélangeurs. Là, les copeaux sont brassés avec le liant (6 à 12% du poids des copeaux secs), que l'on introduit sous pression à l'aide d'un pulvérisateur. Pour améliorer la résistance des panneaux en particules de bois agglomérées à l'eau, on ajoute à la résine une addition hydrophobe (émulsion de paraffine, etc.).

La pâte ainsi préparée est versée par une machine dans un moule, où elle subit un premier pressage à froid (sous une pression de 5-20 kg/cm^2). Ensuite, on procède au pressage définitif à chaud sous une pression pouvant atteindre 35 kg/cm^2 (pour les panneaux semi-lourds) et à une température de 120 à 190 °C. Pendant ce pressage à chaud, la résine durcit et agglomère les copeaux en une masse monolithe.

Après pressage, les panneaux reposent dans l'atelier pendant 4 à 7 jours, pour acquérir la solidité nécessaire. Ensuite, on ébarbe les bords, on les rectifie et on envoie les panneaux au magasin des produits finis.

Dernièrement, certaines entreprises ont commencé à appliquer le procédé de pressage continu, en utilisant des presses perfectionnées à fonctionnement continu. Dans ces presses, la pâte de copeaux est moulée et comprimée en une bande continue, qui est ensuite sectionnée en panneaux de la forme et des dimensions voulues. Le pressage continu permet de fabriquer des panneaux de toute longueur.

Les panneaux en particules de bois agglomérées ont généralement les dimensions suivantes : longueur 200 à 360 cm, largeur 120 à 180 cm, épaisseur 8 à 50 mm.

Les panneaux en particules de bois agglomérées ne remplacent pas seulement les bois sciés de qualité supérieure, mais sont supérieurs à ces bois par certaines de leurs propriétés. En particulier, l'isotropie, c'est-à-dire la constance des diverses caractéristiques dans toutes les directions, est une qualité précieuse de ces panneaux. C'est grâce à cette qualité que les panneaux conservent leur forme sans s'incurver, et surtout qu'ils ont la même résistance dans le sens de la longueur et de la largeur.

Les principales caractéristiques physico-mécaniques des panneaux en particules de bois agglomérées semi-lourds destinés aux murs sont les suivantes : masse volumique 450

à 470 kg/m³ ; résistance limite à la flexion 70 à 210 kg/cm² ; absorption d'eau en 24 h 40 à 65% ; humidité hygroscopique 7 à 8.

Les panneaux en particules de bois agglomérées sont faciles à travailler mécaniquement (sciage, perçage, etc.). Ils ont d'excellentes propriétés d'isolation phonique et thermique. Les panneaux semi-lourds servent principalement à recouvrir les murs des salles de spectacle, des foyers des cinémas et théâtres, des écoles (insonorisation). On les emploie également pour construire les cloisons dans les édifices publics et les immeubles d'habitation. Les panneaux sont vissés ou cloués à leur support, ou bien posés sur un mastic.

Plastiques en papier stratifié

Les plastiques en papier stratifié sont des produits en feuilles que l'on obtient par pressage à chaud de certains papiers spéciaux imprégnés de résines synthétiques.

La surface dure et brillante du papier stratifié peut être monochrome, mais le plus souvent elle imite certaines variétés de bois de qualité supérieure (noyer, chêne, bouleau), ou certaines roches (marbre, malachite, etc.).

Les principales matières premières employées pour la fabrication des papiers stratifiés sont les résines phénol-formaldéhyde, les résines carbamide et certains papiers spéciaux. On classe ces papiers en deux groupes :

1) papier destiné aux couches intérieures du plastique. On fabrique ce papier avec de la pâte écrue ou avec de la pâte provenant d'un bois non écorcé ;

2) papier de couverture, destiné à donner l'aspect extérieur au plastique ; on le fabrique avec une pâte blanchie ayant une grande résistance.

D'après l'aspect extérieur que l'on désire, le papier de couverture peut être monochrome et bien avoir une couleur ou une nuance quelconque, ou bien porter des motifs réalisés par un procédé typographique.

On fabrique les plastiques en papier stratifié en opérant de la facon suivante :

1) imprégnation des papiers spéciaux avec des résines synthétiques ;

2) séchage du papier imprégné ;

3) coupage du papier sec conformément aux dimensions des feuilles ;

4) mise en place des feuilles en paquets ;

5) pressage à chaud des paquets de feuilles ;

6) ébarbage des feuilles de papier stratifié.

On fabrique les plastiques en papier stratifié aux dimensions suivantes : 200 × 85, 150 × 100, 100 × 100, 100 × × 85 cm ; épaisseurs 1,0 ; 1,5 et 2,0 mm. Une feuille de 1 mm d'épaisseur pèse 1,2 kg/m^2.

Les caractéristiques physico-mécaniques principales des plastiques en papier stratifié sont : masse volumique 1,4 g/cm^3, au moins ; résistance limite à la traction 900 à 1 800 kg/cm^2 ; dureté Brinell 25 kg/mm^2, au moins ; absorption d'eau en 24 h 4% au plus.

Les plastiques en papier stratifié résistent bien au gel, ne se désagrègent pas. Ils sont faciles à travailler mécaniquement par sciage, perçage, fraisage, rabotage, etc.

On peut facilement faire disparaître les taches et les salissures en lavant à l'eau chaude. Les plastiques en papier stratifié sont très employés comme revêtements décoratifs, grâce à leurs excellentes propriétés techniques. Ils sont particulièrement indiqués pour l'aménagement intérieur des cantines et des salles de spectacle, des foyers, des antichambres, etc., car ils sont beaux, durent longtemps et sont hygiéniques.

On peut fixer les feuilles de plastiques en papier stratifié sur les murs au moyen de couvre-joints en bois, de vis, de clous, ou de mastic servant de colle.

b) Carreaux en polystyrène

Les carreaux en polystyrène sont des plaques moulées rectangulaires fabriquées en polystyrène.

Les remarquables propriétés du polystyrène (résistance mécanique élevée, coloration aisée, imperméabilité, légèreté) permettent de considérer les carreaux en cette matière comme un excellent matériau de revêtement pour les murs des cabines de douches, les toilettes, les cuisines, les locaux commerciaux, les établissements médicaux, les garderies et les crèches.

Les carreaux sont posés sur les murs avec des mastics spéciaux au collophane. Les dimensions des carreaux sont

100 × 100 mm et 150 × 150 mm. La face arrière des carreaux comporte un bord de 6 à 8 mm de large et une surface en relief. L'épaisseur des carreaux est de 1,25 mm.

On fabrique les carreaux avec du polystyrène par moulage sous pression. Le polystyrène, qui arrive des usines chimiques sous forme granulée est envoyé dans la trémie d'alimentation d'une presse automatique МЛ-50 ou МЛ-250. Il passe dans un compartiment où il est ramolli à une température de 200 à 250 °C, pour être ensuite refoulé par un piston hydraulique dans le moule. On règle automatiquement l'expulsion des pièces moulées après une durée de séjour nécessaire dans la presse. La température du compartiment de ramollissement est aussi réglée automatiquement.

c) Poroplastes

Les poroplastes sont des matières plastiques poreuses et légères, constituées par des cellules fermées en matière plastique, qui sont remplies par de l'air ou par un autre gaz quelconque. On peut employer comme matières premières de nombreuses résines polymères, par exemple le polystyrène, les résines phénol-formaldéhyde, les urées-formaldéhydes, les polyesters, les polyuréthanes, etc.

Polystyrène mousse

On produit le polystyrène mousse en deux marques ou qualités ПС-1 et ПС-4, sous la forme de plaques de 1 000 × 600 × 100 mm. On fabrique également des pièces minces.

Le tableau 22 indique les caractéristiques physico-mécaniques du polystyrène mousse.

Pour fabriquer le polystyrène mousse, on emploie comme matière première une émulsion de polystyrène, le porophore «ЧХЗ», etc. La méthode de fabrication est la suivante. Le polystyrène est broyé dans un broyeur à boulets, puis tamisé. Ensuite, les composants sont mélangés suivant les proportions voulues (1 à 7% de porophore). La masse obtenue est encore tamisée, puis transformée en mousse dans des caissons spéciaux. Cette matière mousseuse est envoyée à la presse, où on la comprime légèrement et où on la laisse refroidir.

Tableau 22

Caractéristiques physico-mécaniques du polystyrène mousse

Caractéristiques	Marques	
	ПС-1	ПС-4
Masse volumique, en kg/m³	60-220	45-80
Résistance limite minimale:		
à la traction, en kg/cm², au moins	26,0	37,0
à la compression, en kg/cm², au moins	3,0-30,0	1,7-4,0
Retrait linéaire à 60 °C (%), au plus	0,4	0,8
Absorption d'eau en 24 h (%), au plus	0,3	0,3
Combustibilité	brûle	brûle
Température de service, °C	60	60

Le polystyrène mousse des marques indiquées plus haut peut être employé comme isolant thermique et acoustique, sous forme de panneaux à trois couches.

Le polystyrène est extrêmement rigide, ce qui permet de l'employer pour fabriquer des panneaux en trois couches.

Chlorure de polyvinyle mousse (PVC-mousse)

Le PVC-mousse est une matière plastique ayant l'aspect d'une mousse dure à structure poreuse uniforme (cellules fermées) dont les vides sont remplis de gaz. Les PVC-mousse des marques ou qualités ПХВ-1 et ПХВ-2 sont fabriqués sous forme de feuilles de 1 000 × 500 mm et de 40 à 60 mm d'épaisseur.

Le tableau 23 indique les caractéristiques physico-mécaniques du PVC-mousse.

Pour fabriquer le PVC-mousse, on peut employer comme matière première une résine de PVC, l'ester méthylique de l'acide méthacrylique, le porophore «ЧХЗ», le bicarbonate de sodium et le carbonate d'ammonium.

La fabrication du PVC-mousse est analogue à celle du polystyrène-mousse, dont elle ne diffère que par quelques modifications des régimes de travail.

On peut employer les plastiques mousses des marques ПХВ-1 et ПХВ-2 comme isolant thermique et acoustique dans les panneaux de murs à trois couches.

Tableau 23

Caractéristiques physico-mécaniques du PVC-mousse

Paramètres	Marques	
	ПХВ-1	ПХВ-2
Masse volumique, en kg/m³	70,0-130,0	130,0-220,0
Résistance:		
à la traction, en kg/cm², au moins	42,0	50,0
à la compression, en kg/cm², au moins	4,0-7,0	6,0-15,0
Retrait linéaire à 60° C (%), au plus	1,0	1,0
Absorption d'eau en 24 h (%)	0,2-0,25	0,3
Combustibilité	s'éteint de lui-même	
Température de service, °C	60	60

Mipor

Le mipor, matière plastique mousse à base d'urée-formaldéhyde, se présente sous l'aspect d'une mousse durcie.

On fabrique le mipor sous la forme de blocs de 0,015 à 0,025 m³, dont l'épaisseur peut être de 20 ou de 10 cm.

Le tableau 24 indique les caractéristiques physico-mécaniques du mipor.

Tableau 24

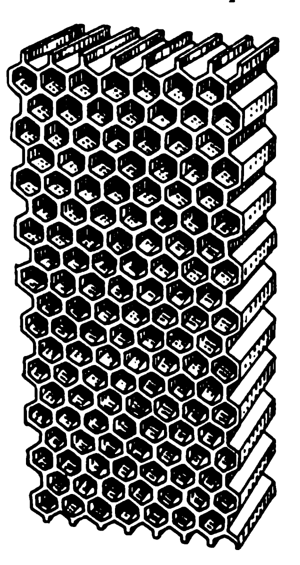
Caractéristiques physico-mécaniques du mipor

Paramètres	Valeur
Masse volumique, en kg/m³	15—20
Coefficient de conductivité, kcal/m·h·°C	0,027
Résistance à la compression, en kg/cm²	4,2—4,8
Humidité maximale . . .	12%
Plasticité	Le matériau ne doit pas se détériorer lorsqu'il est comprimé à 20%
Température de service . .	Jusqu'à 150 °C

Pour fabriquer le mipor, on emploie comme matières premières une résine urée-formaldéhyde et la matière de contact de Pétrov, ainsi que des antipyrènes (ignifuges) (voir chap. X).

On fabrique le mipor de la façon suivante. Dans la machine, qui contient un mélangeur, on verse la solution aqueuse de résine urée-formaldéhyde et la substance génératrice de mousse, et l'on brasse énergiquement. La mousse formée est versée dans des moules métalliques qui sont envoyés dans des compartiments. Dans ces compartiments, le mélange durcit en quelques heures, à une température de 20 à 25 °C. Les blocs ainsi obtenus sont desséchés en trois jours à une température d'environ 50 °C.

Le mipor est un bon matériau calorifuge car il est léger et possède une faible conductivité thermique. Sa résistance à la compression est trop faible pour l'employer indépendamment dans des éléments structuraux. On ne doit donc l'employer que comme matériau de remplissage léger dans les ossatures des locaux où l'on n'exige pas une résistance élevée à l'humidité.


Fig. 141. Plastique alvéolaire (nid d'abeilles)

Plastiques alvéolaires (nids d'abeilles)

On fabrique les plastiques alvéolaires avec diverses matières, par exemple tissus de coton, papier kraft, etc. Les colles employées sont des résines phénol-formaldéhyde ou bien des mélanges de résines à base de polyestère. La fig. 141 représente un plastique alvéolaire (nid d'abeilles).

La charge sous forme de feuilles (tissu, papier, etc.) doit être tout d'abord imprégnée d'une résine quelconque. La matière est ensuite moulée pour former les nids d'abeilles. Les feuilles gaufrées ainsi réalisées sont recouvertes de colle, puis empilées et collées pour constituer des blocs à la

température ordinaire ou à une température plus élevée, sous une pression de 0,25 à 5 kg/cm^2.

Les plastiques alvéolaires en nids d'abeilles ont les caractéristiques suivantes : poids 60 à 140 kg/m^3 ; résistance de 15 à 70 kg/cm^2, longueur 1 000 à 1 800 mm, largeur 550 à 650 mm.

Les plastiques alvéolaires sont d'excellents isolants thermiques et acoustiques.

d) Matériaux pour revêtements de sols

Les matériaux pour revêtements de sols doivent avoir une bonne résistance mécanique, une bonne résistance à l'abrasion, n'absorber qu'une faible quantité d'eau, et ne pas gonfler à l'humidité. En outre, ils doivent avoir un bel aspect.

Dalles pour sols

Actuellement, on fabrique les dalles pour sols à base de diverses résines synthétiques : mélanges d'amiante, de résines phénoliques, résidus de résines.

La composition des dalles en matière plastique comprend des résines synthétiques de coumarone et de PVC, ou simplement de coumarone. Dans le premier cas, on ajoute au mélange de résine du dibutylphtalate qui accroît la plasticité du produit, ainsi que des charges (farine de bois, talc).

On ajoute également des pigments colorants.

Si l'on emploie seulement une résine synthétique de coumarone, le plastifiant employé est l'huile de lin et les charges sont l'amiante, la farine de bois, le talc et des pigments.

On fabrique les *dalles vinyliques d'amiante* en une seule couleur, ou bien en leur donnant un aspect marbré. On emploie comme pigments le minium de plomb, le rouge de Prusse (oxyde de fer rouge), l'oxyde de chrome, divers jaunes à base de plomb, l'oxyde de zinc, le lithopone et le rédoxoïde.

Pour fabriquer ces dalles, on mélange d'abord soigneusement les composants, puis la masse ainsi préparée est calandrée, après quoi elle se transforme en un ruban continu que l'on sectionne en dalles.

On emploie les dalles vinyliques d'amiante pour les sols des édifices publics, des immeubles d'habitation, des bâtiments industriels. Il ne faut pas employer ces dalles dans les établissements de bains ni dans les locaux où elles peuvent être attaquées par les huiles minérales.

On pose ces dalles sur un support lissé de béton, d'asphalte ou d'argile compactée, et on les colle avec des adhésifs bitumineux à froid.

Les dimensions de ces dalles sont les suivantes : 150 × × 150 mm, 200 × 200 mm et 300 × 150 mm. Leur épaisseur est de 2 mm pour les dalles de PVC, et de 3 mm pour les dalles en coumarone.

On fabrique les *dalles de phénolite* avec des résines phénol-formaldéhyde. Ces produits résistent remarquablement aux acides, ce qui les distingue des autres produits.

Ces dalles ont 300 × 300 mm et 150 × 150 mm, et une épaisseur de 4 à 6 mm. Elles pèsent 1 300 à 1 400 kg/m³, et leur absorption d'eau ne dépasse pas 0,5% en 24 heures. On emploie les dalles de phénolite pour le revêtement des murs et les sols des ateliers, laboratoires et salles d'eau.

On pose ces dalles sur un support rigide, et on les colle avec des adhésifs bitumineux ou avec un adhésif à base de résines phénol-formaldéhyde.

Sols plastiques sans joints

La masse à poser est préparée directement sur le chantier.

Le liant employé pour ces sols est une émulsion d'acétate de polyvinyle plastifié, fabriquée en usine et contenant 50% de résine sèche et 7,5% de plastifiant. On applique la masse d'usure sur une couche de fond étendue sur le support.

La première couche a la composition suivante (en poids) : une partie d'émulsion d'acétate de polyvinyle, quatre parties de sable quartzeux fin de 0,2 mm au maximum, 0,3 partie de pigment minéral et 0,17 partie d'eau.

Avant d'appliquer cette couche, il faut soigneusement lisser le support et le débarrasser de toute salissure ou poussière. Le support d'un sol plastique sans joints peut être constitué par des dalles préfabriquées de béton armé ou des panneaux en fibre de bois, ou bien par une chape en béton de laitier ou en ciment. On applique, s'il est nécessaire,

une deuxième couche de même composition que la couche d'usure, mais cette fois sans addition d'une quantité d'eau supplémentaire.

Après séchage et lissage de la surface ainsi préparée, on applique en deux fois la couche d'usure, qui a la composition pondérale suivante : une partie d'émulsion d'acétate de polyvinyle, 0,9 partie de sable broyé, 0,10 à 0,15 partie d'un pigment minéral et 0,3 partie d'eau.

L'épaisseur totale d'un sol plastique sans joints ne doit pas dépasser 2,5 à 3 mm, dont 1 à 1,5 mm constitue la couche d'usure.

Les sols plastiques sans joints sont recommandés pour les immeubles d'habitation et édifices publics. Ils coûtent 3,5 à 4 fois moins que les sols en parquets ordinaires, et 1,5 à 2 fois moins que les sols en linoléum.

Linoléum

Le linoléum est l'un des produits les plus employés pour les revêtements de sols.

En Union Soviétique, on fabrique actuellement les variétés suivantes de linoléum :

1) le linoléum sans support (avec tissus à base de résines de PVC) ;

2) le linoléum de PVC à base de tissu et de résines de PVC ;

3) le linoléum caoutchouté (appelé également réline) ;

4) le nitrolinoléum, à base de nitrocellulose ;

5) le linoléum glyphtal à base de résine glyphtal modifiée par des huiles végétales.

L e l i n o l é u m d e P V C. En Union Soviétique, on fabrique le linoléum en PVC par deux méthodes :

a) par calandrage (linoléum sans support) ;

b) par application du mélange sur toile (linoléum avec support).

On fabrique le linoléum sans support avec une résine de PVC à laquelle on ajoute une charge (talc), un plastifiant (dibutylphtalate), un adoucissant (huile de transformateur), un stabilisant (stéarate de calcium) et un colorant.

Le procédé de fabrication du linoléum sans support comprend les opérations principales suivantes : préparation du mélange, cylindrage et calandrage.

On prépare le mélange dans un mélangeur à palettes. Sans arrêter le mélangeur, on ajoute successivement le dibutylphtalate, l'huile de transformateur, le minium de plomb et du noir de carbone ou de la suie. Après avoir brassé ces composants pendant 15 mn, on ajoute le stéarate de calcium et la résine de PVC, puis, 10 à 15 mn plus tard, la charge. Tous ces composants sont ensuite mélangés dans le mélangeur pendant une heure et demie à 80 °C. L'opération une fois terminée, on vide le mélangeur et l'on envoie le mélange au cylindrage.

Avant de faire passer le mélange entre les cylindres, ceux-ci sont alimentés en vapeur sous une pression de 11 atm. On règle la température de la surface des cylindres entre 150 et 160 °C. On soumet au cylindrage de 30 à 40 kg de mélange à la fois. Le cylindrage se poursuit pendant 40 mn, jusqu'à ce que la masse ait une surface lisse, sans granules visibles à l'œil nu. Ensuite, la matière est détachée du cylindre en blocs que l'on envoie sur un transporteur à courroie ou bien sur la table réceptrice de la calandreuse chauffée à la vapeur.

Le calandrage de la matière plastique se fait dans une calandreuse à quatre cylindres. On envoie la vapeur de réchauffage dans l'enceinte des cylindres. Le quatrième cylindre est destiné à refroidir la matière. En quittant les cylindres chauds, la bande de linoléum est envoyée au cylindre de refroidissement. Ensuite, pour obtenir la largeur voulue, on sectionne les bords de la bande avec des cisailles à rouleaux.

Les dimensions d'un rouleau de linoléum doivent être les suivantes : longueur minimale 12 m, largeur 1,6 m, épaisseur 2,0 à 2,5 mm.

La fabrication du linoléum par application d'un mélange de résine sur une toile se fait de la façon suivante : on prépare le mélange de linoléum, on l'applique sur la toile, on le traite thermiquement et on le comprime à l'aide de cylindres spéciaux. Ensuite, on coupe les bords et l'on sectionne le ruban continu pour obtenir des rouleaux de longueur déterminée.

Dans l'atelier de préparation, on mélange les composants suivants de la charge dans un mélangeur : résines de PVC, dibutylphtalate (plastifiant) ; talc (agrégat), huile à broches, siccatif et colorants.

Les composants une fois soigneusement mélangés, c'est-à-dire au bout de 50 mn, la masse de linoléum tombe dans une trémie, d'où un palan électrique la véhicule vers une machine à fonctionnement continu. Le mélange plastique se dépose en une couche d'épaisseur uniforme et déterminée sur la toile, introduite dans la machine sous forme d'une bande continue débitée par une bobine. Un système de cylindres régularise l'opération.

Ensuite, la toile portant la couche de matière traverse un compartiment de traitement thermique, où la polymérisation de la résine qui se transforme en une matière élastique se fait à 150-180 °C.

Après ce traitement thermique, le linoléum passe entre les cylindres chauds et les cylindres froids qui le compriment et le refroidissent. On découpe les bords mécaniquement, puis le ruban continu est découpé en rouleaux de 12 m de long.

Ces pièces de linoléum sont enroulées, enveloppées dans du papier et envoyées au magasin par transporteur.

Le linoléum caoutchouté appelé aussi réline est un matériau à deux couches en rouleaux : la couche inférieure ou support est fabriquée avec un mélange de vieux caoutchouc broyé et du bitume et la couche supérieure avec un mélange de caoutchoucs colorés, à base de caoutchouc synthétique.

Pour fabriquer la réline, on emploie les matières premières suivantes : vieux caoutchouc broyé dont les particules ont de 1 à 1,5 mm, bitume de pétrole marques БН-IV et БН-V, mélange de caoutchoucs synthétiques СКБ et СКС-30 pour la couche supérieure, silice pure appelée aussi suie blanche (SiO_2), et un colorant qui peut être du minium de plomb ou tout pigment organique.

La fabrication de la réline comprend les opérations suivantes :

1) broyage des vieux pneus d'automobile ;

2) préparation du mélange bitume-caoutchouc pour la couche inférieure ;

3) calandrage du mélange bitume-caoutchouc en bandes ;

4) préparation du mélange de caoutchouc coloré pour la couche supérieure ;

5) calandrage du mélange de caoutchouc coloré en bande ;

6) application des deux couches l'une contre l'autre et vulcanisation de la matière.

Le broyage des vieux pneus se fait dans des machines spéciales. Des découpeuses de toiles détachent les tringles. Ensuite, la chape est découpée avec des cisailles mécaniques, fracturée en tronçons semi-circulaires de 20 à 25 mm de large, et chargée dans des cylindres broyeurs. Le mélange de caoutchouc broyé et de tissu est ensuite criblé.

Le mélange passé par les cribles est envoyé dans un séparateur magnétique qui élimine les particules éventuelles de métal. Ensuite, le mélange prêt est envoyé dans une trémie.

On chauffe préalablement le mélangeur jusqu'à 150 °C, et l'on y introduit le bitume et les plastifiants, que l'on chauffe jusqu'à fusion. Ensuite, on y déverse le caoutchouc broyé et on ajoute les autres composants.

On brasse continuellement le mélange à 150 °C pendant une heure. Ensuite, la masse est envoyée dans des tambours de mélange, où on la brasse encore pendant 12 à 15 mn. Simultanément, on introduit le soufre et l'accélérateur de vulcanisation (thyuram). Le mélange ainsi traité est ensuite détaché en plaques des cylindres, refroidi dans l'eau et stocké provisoirement.

La masse préparée est envoyée dans les cylindres de préparation qui se trouvent près de la calandre, puis dirigée à l'état chaud dans la calandre même pour y être calandrée en bande de largeur et d'épaisseur voulues. Cette bande est ensuite enroulée, avec interposition de feuilles de tissu qui empêchent les collages.

On prépare le mélange de caoutchouc coloré destiné à la couche supérieure dans des cylindres mélangeurs clos. Le calandrage du mélange de caoutchouc coloré se fait de la même façon que pour la couche inférieure sauf une certaine modification du régime thermique.

Le jonctionnement des deux couches et la vulcanisation se font simultanément sur un vulcanisateur à l'action continue du type à tambour, qui comporte un dispositif transporteur à tendeur. A la sortie du vulcanisateur, la réline passe sur un transporteur à courroie et s'enroule en rouleaux de dimensions voulues.

On fabrique la réline en bandes de 12 m de long, 1,25 à 1,6 m de large et 3,0 à 5,0 mm d'épaisseur. La réline peut avoir toute couleur unie ou être marbrée.

Caractéristiques physico-mécaniques de la réline : absorption d'eau maximale en 24 h 2,0% ; abrasion 0,05 g/cm², au plus.

La réline conserve ses caractéristiques mécaniques dans une gamme étendue de températures de —25 °C à +80 °C. Elle a une faible conductivité thermique et phonique et constitue un bon matériau d'étanchéité.

On colle la réline sur son support avec un mastic bitumineux chaud. Le support peut être du béton, du bois ou des panneaux en fibre de bois. Le mastic bitumineux chaud adhère énergiquement à la couche inférieure de la réline et encore plus après refroidissement.

Les joints de deux bandes de réline contiguës sont callés au moyen d'une bande de toile spéciale de 5 cm de large, recouverte d'un mélange bitume-caoutchouc. Pour coller cette bande de toile à la face inférieure de la réline, on couvre les bords de la bande de réline et la surface de la bande en caoutchouc d'une mince couche de colle n° 88. Ensuite, on abaisse le bord de la réline sur la bande de toile et l'on presse tout en aplanissant la surface avec un chiffon doux et propre ou avec un rouleau métallique. On place des lattes de bois là où on a collé les bandes et on laisse sécher les joints pendant 24 heures.

Le linoléum à la nitrocellulose est un produit plastique incombustible sous forme de nappe, constitué par du colloxyline (nitrocellulose), des plastifiants, une charge et un produit ignifuge.

Les matières premières employées pour fabriquer le linoléum à la nitrocellulose, ou nitrolinoléum, sont les suivantes : colloxyline L, centralite, dibutylphtalate, tricrésylphosphate, huile de vaseline ou vaseline, cendres de pyrites, sulfate d'aluminium, plâtre, poussière d'amiante, acide borique, pigments organiques.

Le procédé de fabrication du nitrolinoléum comprend les étapes suivantes :

1) préparation des composants ;
2) préparation du mélange ternaire de plastifiants ;
3) cuisson du mélange de linoléum ;
4) essorage et tamisage ;
5) mélange du linoléum avec les charges et les matières ignifuges ;
6) cylindrage ;

7) maturation du ruban de linoléum, ébarbage des bords et contrôle.

La cuisson du mélange de linoléum se fait dans une chaudière en milieu aqueux, le rapport du poids total des composants au poids de l'eau étant de 1/4. On verse d'abord l'eau dans la chaudière. Ensuite, tout en brassant, on introduit le colloxyline, puis on ajoute l'huile de vaseline et le colorant. La température à l'intérieur de la chaudière de cuisson doit être de 35 à 45 °C. La durée du traitement dans la chaudière varie de 2 à 4 h.

On mélange à la masse dans le mélangeur des substances ignifuges et des charges. Ensuite, la masse de linoléum est envoyée au cylindrage. La gélatinisation a lieu sur des cylindres chauds horizontaux de 200 mm de diamètre et de 1 250 mm de long. Ensuite, le ruban passe entre des cylindres de formage.

A la sortie des cylindres, le ruban de linoléum passe sur des rayons, où a lieu la maturation à une température de 10 à 30 °C. Le ruban est ensuite sectionné dans une machine. On peut donner au nitrolinoléum diverses couleurs.

On emploie le nitrolinoléum comme revêtement des sols des ateliers, ainsi que dans les immeubles d'habitation et édifices publics. Ce matériau ne doit pas être employé dans les locaux où l'on emploie des acides et des dissolvants.

e) Etanchéités

Parmi les matériaux à base de résines polymères, on utilise comme étanchéités une matière contenant du polyisobutylène, un film de polyéthylène et un film de PVC.

ГМП—étanchéité à base de polyisobutylène

ГМП est un matériau en feuilles ou rouleaux très durable. On le fabrique en mélangeant un bitume de marque БН-IV ou БН-V, du polyisobutylène et de la résine phénol-formaldéhyde n° 17 avec des charges fibreuse ou pulvérulente. On passe ce mélange au laminoir pour produire des nappes. Ce matériau est livré en rouleaux d'une surface de 5 m^2. La largeur d'un rouleau est de 600 à 800 mm. L'épaisseur de l'étanchéité est de 2 mm. Le poids de ce matériau est d'environ 3 kg/m^2.

On fabrique les marques ou qualités suivantes : ГМП-4, ГМП-6, ГМП-8 et ГМП-10. Les chiffres qui accompagnent ces désignations représentent la proportion de polyisobutylène dans la matière (en %). Le tableau 25 donne les caractéristiques physico-mécaniques de ces quatre marques d'étanchéité.

Tableau 25

Caractéristiques physico-mécaniques des étanchéités type ГМП

Caractéristiques	Unité de mesure	Marques			
		ГМП-4	ГМП-6	ГМП-8	ГМП-10
Résistance limite min. à la rupture à 18±2 °C (bande de 220×50×2 mm).	kg/cm²	9,0	7,0	6,0	5,0
Allongement relatif min. à 18±2 °C	%	18,0	25,0	30,0	40,0
Plasticité maximale sur une tige de 30 mm de diamètre (épaisseur de l'étanchéité 2 mm)	°C	−5,0	−15,0	−20,0	−25,0
Résistance à la chaleur	Ne se déforme pas pendant 5 heures à une température d'au moins 90 °C				
Absorption d'eau max. en 7 jours à 25 °C	%	1	1	1	1
Imperméabilité à l'eau	Ne laisse pas passer l'eau pendant 3 jours sous une pression de 6 atm				

On emploie les étanchéités type ГМП comme couvertures des toitures-terrasses et pour rendre étanches les constructions souterraines quand on veut assurer leur longévité tout en conservant une forte résistance à la chaleur et une bonne plasticité aux basses températures.

Izole

L'izole est une étanchéité et un matériau de couverture que l'on fabrique à partir d'un mélange de caoutchouc et de bitume auquel on ajoute une charge.

On prépare le liant bitume-caoutchouc en dévulcanisant du vieux caoutchouc dans un excès de bitume. Les propriétés physiques et mécaniques de ce liant diffèrent de celles du caoutchouc et du bitume.

Pour fabriquer l'izole, on peut employer comme charge une matière minérale quelconque, finement broyée, qui assure une bonne adhérence avec le polymère. On peut citer en particulier le talc, le calcaire, la terre d'infusoires, la marshallite, l'amiante, etc.

En dehors des composants principaux (liant et charges), l'izole contient également 2% de plastifiant (résine coumaronique) et 1% d'antiseptique (huile créosotée).

Suivant la composition du liant bitume-caoutchouc et la proportion et la qualité de la charge, l'izole peut être obtenu sous forme d'étanchéité en rouleaux, sous forme de plaques de couverture ou sous forme de mastic d'étanchéité. Le tableau 26 donne quelques exemples de composition de différents genres d'izoles.

L'izole d'étanchéité est fabriqué sous forme de rouleaux d'une surface de 12 à 15 m^2 et d'une épaisseur de 2 mm.

L'absorption d'eau de l'izole en rouleaux est inférieure à 1%. Ce matériau résiste bien à la putréfaction et sa résistance à la traction est de 8 kg/cm^2.

L'izole préparé avec un liant bitume-caoutchouc peut s'allonger de 75% à la traction. Il conserve bien son élasticité aux températures négatives. C'est donc un bon matériau d'étanchéité dans les ouvrages qui subissent de fortes déformations (tassement).

On peut utiliser l'izole pour fabriquer des plaques de couverture de 4 à 6 mm d'épaisseur, par étampage d'une feuille. Ces plaques peuvent être collées avec un mastic d'izole. Le mastic d'izole est une colle adhérant énergiquement aux métaux, au verre, aux matières céramiques, au béton. Il remplit essentiellement le rôle d'étanchéité.

L'izole d'étanchéité et de couverture est fabriqué selon le procédé suivant. On dévulcanise d'abord du vieux caoutchouc en vue de lui redonner en partie les propriétés initiales du caoutchouc.

Tableau 26

Compositions de différents genres d'izole

Composants	Quantité de matériau en %		
	Pour étanchéités en rouleaux	Pour plaques de couverture	Pour mastics d'étanchéité
Cautchouc usagé	20—25	8—13	15—8
Bitume marque III	20—25	9—13	68—78
Résine coumaronique . . .	2,0	—	3—4
Rubérax	28,20	35—27	—
Polyisobutylène	—	—	0—1,5
Charge	30	49—47	14—8
Huile créosotée	1	1	1

La dévulcanisation se fait à la température de 170 à 180 °C dans un mélangeur que l'on charge d'un mélange de morceaux de vieux caoutchouc et de bitume. Ce mélange est brassé durant 30 à 40 minutes.

Au liant bitume-caoutchouc ainsi obtenu, on ajoute du bitume Rubérax (bitume d'une haute résistance à la chaleur) et une charge. Ensuite, on brasse de nouveau la masse dans le mélangeur pendant 8 à 10 mn, puis, pour obtenir une masse plastique et homogène, on la fait passer par des cylindres par charges successives de 25 à 30 kg. Ce cylindrage est accompagné d'un refroidissement permanent et dure 5 à 7 mn.

Après le cylindrage, la masse passe dans une calandre où elle est transformée en ruban continu, qui est enroulé en rouleaux et emballé.

L'izole en rouleaux peut servir d'étanchéité pour les fondations, les sous-sols, les piscines, les silos, les réservoirs, peut être employé comme étanchéité des toitures.

On emploie le mastic comme étanchéité d'une surface de configuration compliquée.

Film de polyéthylène

L'emploi du polyéthylène sous forme de film présente un grand intérêt pour les travaux d'étanchéité.

Ce film est fabriqué sous forme de nappes de toute longueur, d'une largeur de 150 à 650 mm et d'une épaisseur de 0,1 mm. Les films de polyéthylène peuvent être colorés à volonté à la différence des matériaux contenant un liant bitume-caoutchouc, qui ne sont obtenus qu'en teintes foncées.

Le tableau 27 indique les caractéristiques physico-mécaniques des films de polyéthylène.

Tableau 27

Caractéristiques physico-mécaniques des films de polyéthylène

Caractéristiques	Unité de mesure	Valeur
Résistance à la rupture . .	kg/cm^2	150
Allongement relatif à la rupture	%	250
Absorption d'eau en 24 heures (dans l'eau)	%	0,01

Les films de polyéthylène sont pratiquement imperméables à la vapeur et à l'eau et résistent très bien aux divers agents chimiques agressifs. Ils conservent bien leur élasticité aux températures non inférieures à —70 °C.

On soude les joints par repassage au fer à travers une feuille de papier, à une température de 90 à 130 °C.

Film de PVC

On fabrique les films de PVC avec une résine de PVC à laquelle on ajoute des plastifiants et des stabilisants.

On fabrique des films aux dimensions suivantes : largeur minimale 0,7 m, longueur minimale 5 m, épaisseur 0,20 à 0,25 mm.

Le tableau 28 indique les caractéristiques principales des films en PVC.

Ces films ne corrodent pas les métaux, et ne se fissurent pas quand on les plie à 180° à une température de —25 °C. On les emploie comme étanchéité provisoire, car ils conservent mal leurs propriétés.

Tableau 28

Caractéristiques physico-mécaniques des films de PVC

Caractéristiques	Unité de mesure	Valeur
Charge de rupture	kg/cm²	100
Allongement relatif à la rupture	%	130
Absorption d'eau maximale en 24 heures	%	1,5

f) Canalisations

Les canalisations en matière synthétique sont légères, et résistent très bien en général à la corrosion. Ces canalisations et la robinetterie ont une durée de service très supérieure à celle des canalisations métalliques, du fait qu'elles résistent bien aux attaques des acides et des bases, à l'action des eaux souterraines et aux courants électriques vagabonds.

Les tuyaux sont fabriqués principalement à partir des résines de PVC et du polyéthylène. On emploie également, mais beaucoup moins, d'autres matériaux tels que les acrylates et le polypropylène.

Outre leur bonne résistance à la corrosion, les canalisations en matière plastique ont également l'avantage d'avoir une surface intérieure très lisse. Il en résulte une diminution des pertes de charge à l'écoulement des liquides, ce qui accroît la capacité de passage des canalisations.

Les tuyauteries en matière plastique ont encore l'avantage de supporter la congélation du liquide sans être détériorées.

Les canalisations en matière plastique coûtent encore cher. Mais dès maintenant, on peut estimer que les frais de fabrication des canalisations en matière plastique et des canalisations métalliques sont équivalents, si l'on rapporte ces frais non pas à l'unité de poids mais, par exemple, au débit. L'avantage économique des tuyauteries en matière plastique devient indiscutable si l'on tient compte des économies réalisées dans le transport de ces tuyauteries, de l'augmentation de la durée de service, de la suppression

des frais périodiques de peinture anticorrosive et des frais de réparation et de remplacement des canalisations venues hors d'usage.

Les tuyauteries en matière plastique permettent de simplifier considérablement les travaux de montage et de réduire la main-d'œuvre par l'emploi de canalisations de grande longueur, et la réduction du nombre des raccordements. Les raccordements sont également simplifiés. Au lieu de raccords vissés, qui nécessitent des canalisations métalliques épaisses, on peut employer divers raccordements à évasement collés.

Les tuyauteries en matière plastique ont l'inconvénient de mal résister à la chaleur. On estime habituellement que ces tuyauteries travaillent bien aux températures jusqu'à +50 ou 80 °C. Toutefois les tuyauteries sous une pression de 10 atm ne sont généralement employées que pour des milieux dont la température ne dépasse pas 20 °C.

Au montage des tuyauteries en matière plastique, il faut porter une attention particulière à la réalisation des raccordements, à la compensation thermique des tuyauteries et à leur fixation aux éléments de la structure.

C a n a l i s a t i o n s e n v i n y p l a s t e. Le vinyplaste est une matière thermoplastique que l'on obtient par plastification thermique d'une résine de PVC.

Les canalisations en vinyplaste ont un diamètre extérieur de 10 à 166 mm et une longueur de 1 500 à 3 000 mm.

Ces tuyaux sont destinés au service dans des milieux agressifs, à une température comprise entre 0 et +40 °C.

L'excellente résistance du vinyplaste aux agents chimiques permet de l'employer comme matière anticorrosive.

On utilise les canalisations en vinyplaste pour véhiculer les liquides et gaz agressifs, pour les circuits de ventilation, pour les réseaux d'eau et d'assainissement.

Le vinyplaste se prête bien au travail sur les machines-outils ordinaires utilisées pour les métaux. Pour réaliser les raccordements des tuyaux en vinyplaste, on utilise divers types de manchons, colliers, etc. On pratique également beaucoup les joints soudés.

On colle le vinyplaste d'une façon satisfaisante avec une colle en chlorure de vinyle surchloré, qui est une solution d'une résine de chlorure de vinyle surchloré dans l'acétone, le dichloréthane ou le chlorure de méthylène. Les raccords à évasement sont souvent réalisés par collage.

On fabrique les canalisations en vinyplaste par extrusion, c'est-à-dire en forçant la matière sous pression et à chaud.

T u y a u x e n p o l y é t h y l è n e. Les tuyaux en polyéthylène diffèrent des tuyaux en vinyplaste essentiellement par leur résistance au gel (les tuyaux en polyéthylène ne perdent pas de leur flexibilité jusqu'à —80 °C) et leur degré de plasticité élevé. C'est ce qui permet de fabriquer les tuyaux en polyéthylène d'une longueur jusqu'à 300 m, en les enroulant sur un tambour.

Le polyéthylène a des propriétés diélectriques élevées. Il résiste bien aux acides et bases concentrés, aux divers dissolvants et aux diverses huiles, et de plus il n'absorbe pratiquement pas l'eau.

On fabrique les tuyaux en polyéthylène par extrusion.

La facilité de transformation du polyéthylène et sa plasticité élevée permettent d'adopter de nouvelles solutions pour la pose des canalisations souterraines. Les ouvrages spécialisés ont signalé des excavatrices spéciales, sur lesquelles on a installé un équipement de fabrication des tuyaux en polyéthylène par extrusion. Au fur et à mesure de sa progression, cette machine creuse la tranchée, fabrique les canalisations, les pose dans cette tranchée et les recouvre de terre. Une telle machine peut poser jusqu'à 400 m de tuyauterie par heure.

Les canalisations en polyéthylène supportent très bien les températures en dessous de zéro, on les emloie pour constituer des circuits réfrigérants de grande surface, par exemple, pour les patinoires artificielles. On peut également les employer dans les panneaux chauffants en chauffage par rayonnement.

G r i l l e s d e v e n t i l a t i o n e t g r i l l e s d e r a d i a t e u r s. Ces grilles, fabriquées en matières plastiques par moulage ou étampage présentent un grand avantage sur les grilles métalliques. Elles sont très résistantes tout en étant légères, elles résistent bien à la corrosion et n'ont pas besoin d'être peintes.

On peut en effet obtenir des grilles de diverses couleurs, en ajoutant des pigments à la masse préparée pour le pressage. On emploie alors des résines phénol-formaldéhyde, carbamides, polystyrènes, etc., avec des charges appropriées.

Les méthodes de fabrication des grilles, c'est-à-dire le moulage et le pressage dans une presse hydraulique permettent d'obtenir les motifs et formes les plus variés.

On peut fixer les grilles à l'aide de vis ou de pinces à ressort.

M a t é r i e l   s a n i t a i r e. Les matières plastiques permettent d'obtenir une robinetterie robuste, légère, anticorrosive et d'aspect agréable pour les salles de bains, les cuisines, les toilettes et autres installations sanitaires et hygiéniques.

On peut également fabriquer en matière plastique les baignoires et lavabos (en plastique vitreux polyester), les boîtes à savon, les porte-verres et porte-brosses à dents, et différents autres objets sanitaires. Ces divers objets ont d'excellentes qualités décoratives et de plus résistent parfaitement à l'eau.

Pour les robinets, les flotteurs des réservoirs de chasse d'eau, les raccords tubulaires, etc., on emploie des matières plastiques à base de résines de PVC. Ces matières plastiques satisfont aux conditions les plus sévères en ce qui concerne la présentation, la résistance à l'eau et la résistance à la corrosion.

CHAPITRE XIII

MATÉRIAUX ISOLANTS

Les isolants, encore appelés « calorifuges », ont pour mission d'empêcher les pertes de chaleur, ou au contraire le surchauffage des pièces d'habitation, des locaux de travail, ainsi que des diverses installations thermiques : chaudières à vapeur, conduites de vapeur, chambres froides, etc.

Tous les isolants ont une porosité élevée, une faible masse volumique (inférieure à 1 000 kg/m^3) et un faible coefficient de conductibilité (inférieur à 0,25 kcal/m/h·°C). Les isolants employés dans la construction peuvent être, d'après leur composition chimique, des matériaux *organiques* ou des matériaux *non organiques*, c'est-à-dire *minéraux*.

D'après leur aspect extérieur, on distingue les isolants *pulvérulents*, servant à fabriquer les mastics et à combler les vides dans les murs creux, et les isolants *en rouleaux et en pièces* fabriqués sous forme de feuilles, plaques, coquilles et segments.

Les isolants dont la masse volumique est supérieure à 400 kg/m^3 et dont la résistance mécanique est élevée, sont très employés comme matériaux portants et isolants, c'est-à-dire assurant à la fois l'isolation thermique et le support d'une charge.

Les conditions principales que doivent remplir les isolants sont les suivantes :

1) résistance mécanique suffisante pour que le matériau offre toute sûreté au cours du montage et en cours de service ;

2) résistance aux agents biologiques : imputrescibilité et résistance aux rongeurs ;

3) bonne résistance chimique : il ne doit pas être détérioré par les liquides et les gaz ;

4) le matériau doit être sec et aussi peu hygroscopique que possible, l'humidité étant nuisible à sa bonne conservation (apte à la putréfaction) et à sa conductibilité (le coefficient de conductibilité thermique augmente).

On fabrique les isolants organiques à partir de matières végétales (déchets de bois, roseaux, tourbe, etc.). Comparativement aux isolants minéraux d'amiante, de mâchefer, de verre, etc., les isolants organiques sont plus hygroscopiques, se pourrissent plus facilement sous l'effet de l'humidité et ne supportent pas la chaleur au-delà de 100 °C.

L'emploi d'isolants dans le bâtiment permet de réduire l'épaisseur des murs, le poids de la construction, la consommation en matériaux (acier, ciment, etc.) et enfin le coût de la construction.

De nombreux isolants (laine minérale, panneaux de fibrolite et de fibres de bois, etc.) absorbent bien le son, et par suite sont utilisés également comme isolants acoustiques.

§ 1. MATÉRIAUX ISOLANTS ORGANIQUES

a) Panneaux de fibres de bois ; panneaux de particules de bois agglomérées

Les *panneaux de fibres de bois* sont un matériau en feuilles obtenu par moulage suivi de séchage d'une masse de fibres de bois imprégnée de résines synthétiques. Pour accroître la résistance des panneaux à l'eau, on ajoute une émulsion de paraffine à la masse de fibres de bois.

Les matières premières principalement employées pour fabriquer les panneaux de fibres de bois sont les bois de rebut (dosses, lattes, déchets de sciage, copeaux), le papier usé ainsi que la teille de chanvre ou de lin, les tiges de maïs, de tournesol, etc.

Pour l'isolation thermique et acoustique, on emploie des panneaux de particules de bois agglomérées ayant une masse volumique inférieure à 400 kg/m³.

Les panneaux de fibres de bois dur et demi-dur dont la masse volumique est comprise entre 600 et 1 100 kg/m³ sont fabriqués par pressage à chaud. On les emploie pour les murs et les sols, comme matériaux structuraux.

La fabrication des panneaux isolants en bois comprend les opérations suivantes :

1) préparation de la masse de déchets ;
2) traitement à la vapeur et broyage des déchets pour obtenir une masse fibreuse ;
3) imprégnation de la masse fibreuse par un liant ;
4) moulage des panneaux;
5) séchage des panneaux ;
6) ébarbage des bords.

Le tableau 29 indique les dimensions et les principales caractéristiques physico-mécaniques des panneaux isolants de fibres de bois.

Tableau 29

Dimensions et caractéristiques physico-mécaniques des panneaux isolants de fibre de bois

Désignation	Valeurs numériques
Cotes (mm): longueur . .	3 000; 2 700; 1 800; 1 600; 1 250
largeur . .	1 600; 1 200; 600
épaisseur . .	25; 12,5
Masse volumique (kg/m³)	150—400
Résistance limite mini à la flexion (kg/cm²)	8
Absorption d'eau max. (%)	20
Conductivité thermique max. (kcal/m·h·°C) . .	0,047

Les panneaux de fibre de bois d'une masse volumique de 300 à 500 kg/m³ et d'une épaisseur de 9 à 10 mm, employés pour les revêtements intérieurs sont appelés un plâtre organique sec. Le plâtre sec accélère et réduit le coût des travaux du second œuvre, qui demandent une main-d'œuvre importante.

Panneaux de particules de bois agglomérées. On fabrique ces panneaux par pressage à chaud d'une masse de copeaux de bois imprégnée de résines synthétiques.

Au cours du pressage à chaud, la résine liquide durcit et agglomère les copeaux en une masse monolithe. On peut obtenir des panneaux de différentes masses volumiques selon

le degré de compression. Comme isolants thermique et acoustique, on utilise des panneaux légers de particules de bois agglomérées dont la masse volumique est de 250 à 400 kg/m³. Les qualités isolantes (thermique et acoustique) se dégradent, mais par contre la résistance mécanique augmente, quand la masse volumique augmente. Aussi, les panneaux de particules de bois agglomérées ayant une grande masse volumique (jusqu'à 1 100 kg/m³) servent non seulement d'isolants thermiques, mais encore de matériau structurel pour les murs et les sols.

Les dimensions des panneaux sont les suivantes: longueur de 250 à 360 cm, largeur de 120 à 180 cm, épaisseur de 13 à 25 mm.

Le tableau 30 indique les principales caractéristiques physico-mécaniques des panneaux de particules de bois agglomérées légers.

Tableau 30

Caractéristiques physico-mécaniques principales des panneaux de particules de bois agglomérées légers

Caractéristiques physico-mécaniques	Valeurs moyennes
Masse volumique (kg/m³)	300
Résistance limite à la flexion (kg/cm²)	50
Absorption d'eau max. (%)	80
Conductivité thermique (kcal/m·h·°C)	0,047

On imprègne les panneaux de fibres de bois et les panneaux de particules de bois agglomérées avec des compositions ignifuges spéciales, pour améliorer la protection contre l'incendie, et avec des antiseptiques pour améliorer la résistance à la pourriture (voir pp. 329-334).

Les panneaux isolants de fibre de bois et de particules de bois agglomérées légers servent d'isolation thermique et acoustique des murs, des cloisons, des planchers des immeubles d'habitation, d'isolant thermique des couvertures et des planchers des bâtiments industriels.

On fixe les panneaux aux murs et aux plafonds par collage au moyen d'un mastic ou bien à l'aide de clous galvanisés.

Les panneaux doivent être stockés dans des locaux clos de manière à ne pas être soumis à de fortes variations de température et d'humidité. En cours de transport, il faut les protéger contre les chocs et l'humidité.

b) Plaques de tourbe

La tourbe a une structure fibreuse, et par suite constitue une bonne matière première pour la fabrication des isolants thermiques. On fabrique ces isolants sous forme de plaques, de blocs, de coquilles ou de bourrelets. On emploie surtout des plaques fabriquées avec de la tourbe encore fraîche, c'est-à-dire de la mousse incomplètement transformée (*sphaigne*).

On peut fabriquer les plaques de tourbe par voies humide et sèche.

Dans le procédé humide, la tourbe en morceaux d'une humidité de 90 à 95% est désagrégée en fibres dans un broyeur à tambours dentés. Ensuite, on l'envoie dans des chaudières de cuisson où on la mélange soigneusement avec de l'eau réchauffée jusqu'à 50 ou 60 °C. Pendant cette cuisson, on ajoute à la masse de tourbe certaines substances chimiques qui accroissent sa résistance à l'eau, sa résistance biologique et rendent les plaques moins combustibles.

La masse bien brassée est déversée dans des moules métalliques, munis d'ouvertures pour l'écoulement de l'eau, et l'on comprime la tourbe dans des presses hydrauliques. Après cette compression, les plaques, sans être extraites des moules, subissent un traitement thermique, qui enlève leur humidité. Au cours de ce traitement, les fibres de tourbe séparées sont agglomérées par des substances organiques qui se dégagent de la tourbe pendant son chauffage. On extrait ensuite les plaques de leur moule et on les conserve quelques jours à l'air. Pendant ce séjour, les plaques durcissent et acquièrent leur humidité normale, ou humidité d'équilibre, par suite de leur hygroscopicité.

Le procédé sec diffère du procédé humide du fait que la matière première utilisée est de la tourbe préalablement desséchée (jusqu'à une humidité de 40 ou 50%), et que l'on ne dilue pas avec de l'eau avant le moulage. Ce procédé est plus simple et ne consomme pas beaucoup d'eau, de combustible et d'énergie. La masse volumique des plaques

ainsi obtenues est plus élevée, ce qui réduit leurs qualités isolantes.

Les plaques de tourbe sont des parallélépipèdes rectangles de 100 × 50 × 5 cm et de 100 × 50 × 3 cm.

On distingue les marques ou qualités suivantes, d'après l'application envisagée : BT (difficilement combustibles, résistant à l'eau), B (résistant à l'eau), T (difficilement combustibles) et enfin les plaques ordinaires.

Le tableau 31 donne les caractéristiques physico-mécaniques principales des plaques de tourbe ordinaires.

Tableau 31

Caractéristiques physico-mécaniques des plaques de tourbe ordinaires

Caractéristiques	Procédé de fabrication	
	par voie humide	par voie sèche
Masse volumique à 15% d'humidité (kg/m^3), au plus	170	250
Humidité (%), au plus	15	15
Coefficient de conductivité (kcal/m·h·°C), au plus:		
plaques séchées jusqu'à un poids constant	0,05	0,06
plaques à 15% d'humidité . .	0,06	0,07
Résistance limite à la flexion (kg/cm^2), au moins	3	3
Absorption d'eau en 24 heures (%), au plus	180	180

Ce sont les plaques marques B et BT qui ont la plus grande résistance à l'eau, leurs absorptions d'eau respectives ne dépassent pas 50% et 120%. Par contre, leurs masses volumiques sont un peu plus élevées. Une plaque saturée d'eau ne doit pas se déformer ni se dilater de plus de 10% en volume. Les plaques doivent être conservées dans des conditions évitant d'accroître leur humidité.

On emploie les plaques de tourbe pour isoler les murs, les planchers et les planchers-haut. On les utilise souvent pour améliorer les qualités isolantes des murs en briques et des planchers en béton armé. Enfin, on les utilise largement pour l'isolation des chambres froides.

Les plaques de tourbe doivent être revêtues d'un enduit et être protégées contre l'humidité. Le volume des plaques varie en effet en fonction de l'humidité. Les plaques se déforment quand l'humidité varie fortement, et les joints entre les plaques peuvent même s'ouvrir. Il faut donc fixer avec soin les plaques à la surface que l'on veut isoler. La meilleure façon de fixer les plaques de tourbe sur des murs en maçonnerie consiste à tendre des fils sur les clous qui fixent la plaque au mur. Les fils forment un grillage qui assure une forte adhérence entre l'enduit et la surface de la plaque. On peut également coller les plaques avec un bitume de pétrole fondu.

c) Fibrolite

La fibrolite est un matériau en plaques, que l'on obtient par durcissement d'une masse comprimée constituée par des copeaux de bois mélangés avec une pâte de ciment.

D'après le liant minéral employé, on distingue la fibrolite de ciment Portland et la fibrolite magnésienne (fabriquée avec de la magnésite caustique gâchée avec une solution de chlorure ou de sulfate de magnésium). On fabrique rarement la fibrolite magnésienne, car il est préférable d'employer la magnésite caustique pour d'autres buts, par exemple pour fabriquer des matériaux réfractaires.

En dehors des copeaux de bois ordinaires, on fabrique également la fibrolite avec ce qu'on appelle « laine de bois », constituée par des copeaux de bois longs et fins de 40 à 50 cm de longueur, 4 à 7 mm de largeur et 0,25 à 0,5 mm d'épaisseur. On prépare cette laine de bois avec les déchets du bois (pin, sapin, tremble ou tilleul) sur des machines raboteuses spéciales. Les plaques de fibrolite fabriquées avec de la laine de bois ont une grande résistance mécanique.

La fabrication de la fibrolite de ciment Portland comprend les opérations suivantes :

1) gâchage du ciment par l'eau ;

2) mélange de la pâte de ciment avec les copeaux ;

3) compression du mélange dans des moules, sous une pression d'environ 0,5 kg/cm^2 ;

4) traitement des plaques à la vapeur dans des chambres de durcissement ;

5) décoffrage et séchage des plaques.

En faisant le choix du ciment Portland, ne pas perdre de vue que sa résistance mécanique croît brusquement au

cours des premières heures de durcissement. L'emploi de ciment de ce genre permet de réduire le temps nécessaire au durcissement des plaques ainsi que la consommation en combustible et d'accroître la cadence d'utilisation des moules. C'est pourquoi pour la fabrication des plaques de fibrolite on emploie des ciments Portland finement broyés avec additions de chlorure de calcium (pour accélérer le durcissement).

Les plaques de fibrolite ont des longueurs de 240, 200 et 150 cm, des largeurs de 75 et 50 cm et des épaisseurs de 100, 75, 50 et 25 mm.

On distingue quatre marques ou qualités de fibrolite en fonction de la masse volumique qui dépend du degré de compression : 300, 350, 400 et 500. La fibrolite avec une masse volumique comprise entre 300 et 350 kg/m^3 est appelée calorifuge, celle avec une masse volumique comprise entre 400 et 500 kg/m^3 est appelée fibrolite structurelle.

En fonction de la masse volumique, la résistance limite de la fibrolite à la flexion varie de 4 à 25 kg/cm^2, et son coefficient de conductivité de 0,08 à 0,22 kcal/m·h·°C. Pour éviter toute augmentation de la conductivité, l'humidité des plaques de fibrolite ne devra pas dépasser 15%.

La fibrolite est un matériau semi-combustible ; autrement dit, elle ne brûle pas avec une flamme, mais se consume lentement. Les plaques de fibrolite sont faciles à travailler mécaniquement : on peut les scier, les percer, et y planter des clous. Les enduits divers adhèrent fortement à la surface rugueuse de ce matériau.

Les plaques de fibrolite sont surtout employées dans la construction de logements. La fibrolite structurelle (à résistance plus élevée) est un matériau porteur que l'on emploie dans la construction des cloisons, des murs, ou encore comme remplissage de l'ossature en bois d'un mur (fig. 142).

On emploie la fibrolite calorifuge pour l'isolation thermique des murs et des planchers-haut. Les plaques de fibrolite sont clouées aux charpentes en bois. Quand il s'agit de murs en briques ou en béton ou de dalles de planchers, on fixe généralement les plaques de fibrolite avec une mortier de ciment à la chaux. La fibrolite employée pour les murs doit être recouverte d'un enduit pour empêcher la pénétration de l'humidité et le passage de l'air. On ne doit pas employer ce matériau dans les parties humides des bâtiments (sous-sols, établissements de bains, buanderies,

etc.) ni là où il peut avoir à supporter une température supérieure à 70 °C.

Dans les constructions industrielles, on emploie la fibrolite comme isolation des planchers-haut. On colle la fibrolite avec du mastic bitumineux sur les dalles de béton armé préfabriquées, puis sur la chape de ciment on pose une étanchéité en rouleau.

La fibrolite doit être protégée contre l'humidité en cours de stockage et de transport.

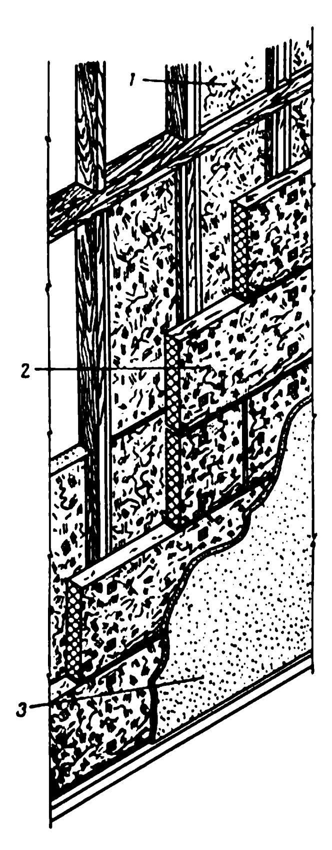


Fig. 142. Ossature en bois d'un mur avec remplissage en fibrolite :
1 — première couche de fibrolite ; 2 — deuxième couche de fibrolite; 3 — enduit

d) Panneaux de roseaux (scirpe, roseau des lacs et marais)

Les panneaux rectangulaires en roseaux sont réalisés avec des roseaux comprimés et maintenus assemblés par un fil d'acier.

Parmi les diverses espèces de roseaux (scirpe, roseau des lacs, etc.), ceux qui conviennent le mieux sont ceux qui ont des tiges longues et souples à canaux longitudinaux et à tissu poreux, ce qui confère une bonne élasticité et une faible conductivité thermique aux pièces.

Pour fabriquer les panneaux en roseaux, on ne doit utiliser que des tiges de première année complètement mûres, sectionnées au moment où elles commencent à jaunir et à perdre leurs feuilles. Les roseaux coupés trop tôt pourrissent rapidement, alors que ceux coupés trop tard sont moins souples.

On prépare les panneaux en roseaux en comprimant dans des presses spéciales les tiges dont on a sectionné les touffes ou panicules, pour les rendre inattaquables par

les rongeurs. Au cours de la compression des tiges, on lie transversalement leurs deux faces par des fils de fer espacés de 14 à 16 cm, et par des attaches en fils de fer à crochets, espacées de 80 à 100 mm (voir fig. 143). Pour ces ligatures, on emploie un fil d'acier galvanisé d'au moins 1,6 mm de diamètre, à raison de 0,7 kg de métal par m² de surface

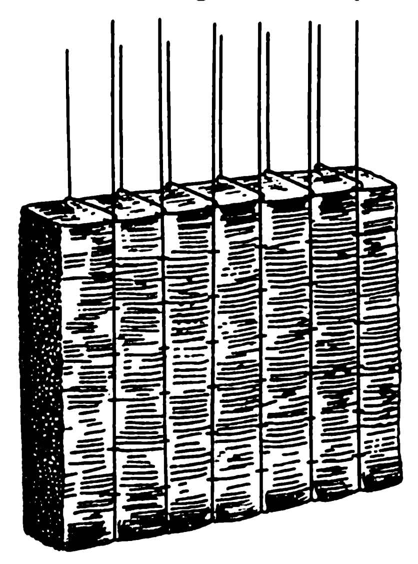


Fig. 143. Panneau de roseaux lié par des attaches en fils de fer

de panneau. Plus les panneaux de roseaux sont comprimés plus ils sont résistants, mais aussi plus leur masse volumique est élevée.

On fabrique des panneaux de roseaux de dimensions suivantes : longueur 240, 260 et 280 cm ; largeur 55, 95, 115 et 150 cm ; épaisseur 30, 50, 70 et 100 mm. Leur masse volumique varie de 200 à 350 kg/m³, la résistance limite à la flexion de 5 à 10 kg/cm², et leur coefficient de conductivité de 0,06 à 0,09 kcal/m·h·°C. L'humidité de ces panneaux ne doit pas dépasser 18%.

Les avantages des panneaux de roseaux sont les suivants : ils sont bon marché (c'est le matériau le moins cher parmi les matériaux isolants), ils se tronçonnent aisément et l'enduit adhère sans lattes. Ce dernier facteur facilite

l'exécution des travaux du second œuvre, et l'économie en lattes compense le coût des fils de fer.

Les panneaux de roseaux présentent les inconvénients suivants : ils sont attaquables par les rongeurs et sont putrescibles. En outre, ils tiennent mal les clous. Les panneaux fortement comprimés ne brûlent pas avec une flamme, mais se consument lentement.

On emploie les panneaux de roseaux comme remplissage des murs à ossature, pour les cloisons, comme isolation des planchers des immeubles d'habitation et des chambres froides. Pour protéger ces panneaux contre la putréfaction et les rendre inattaquables par les rongeurs, on les imprègne avec un antiseptique (solution de sulfate de fer à 5%). On les recouvre d'enduit sur les deux faces pour les rendre moins combustibles et moins perméables à l'air. Cela améliore d'ailleurs les conditions hygiéniques et l'aspect extérieur des murs.

Il n'est pas recommandé d'employer les panneaux de roseaux dans des locaux où l'humidité de l'air dépasse 70%, par exemple dans les établissements de bains, les buanderies, etc. Quand on utilise ces panneaux pour isoler les chambres froides, il faut les protéger efficacement contre l'humidité.

e) Plaques de liège

On fabrique les plaques de liège avec des particules de liège — déchets de fabrication.

Les matières premières employées sont l'écorce du *chêne-liège* et l'écorce de certaines espèces analogues. L'écorce de ces arbres est parcourue d'une façon uniforme par de nombreux canaux très fins remplis d'air, ce qui la rend souple, légère et lui confère une faible conductivité.

On peut fabriquer les plaques de liège avec ou sans colle. Dans le premier procédé, les particules de liège broyées en granulés sont mélangées à des colles pour bois, puis comprimées dans des moules en acier. Après pressage, on sèche les plaques dans leurs moules à une température de 80 °C. Dans le deuxième procédé, les granulés de liège sont comprimés dans une presse, puis chauffés à des températures de 290 à 300 °C. Au cours de ce chauffage, l'air qui se trouve dans les pores du liège se dilate, fait gonfler les particules. Les résines naturelles des particules

agglutinent les granulés entre eux donnant une masse monolithe.

Les dimensions des plaques de liège sont les suivantes : longueur 100 cm, largeur 50 cm, épaisseur 25 à 125 mm.

Comparativement aux plaques fabriquées sans colle, les plaques fabriquées selon le premier procédé ont une résistance mécanique plus élevée, mais leur masse volumique et leur conductivité sont plus élevées. Leurs propriétés isolantes sont donc un peu inférieures.

Le tableau 32 indique les principales caractéristiques physico-mécaniques des plaques de liège.

Les plaques de liège présentent les avantages suivants : elles sont imputrescibles et ininflammables (elles ne brûlent pas, mais se consument très lentement), sont inattaquables par les champignons et les rongeurs.

Tableau 32

Caractéristiques physico-mécaniques des plaques de liège

Caractéristiques	Plaques fabriquées avec colle	Plaques fabriquées sans colle
Masse volumique, en kg/m³ . . .	250—350	150—180
Résistance limite à la flexion, en kg/cm²	2,5—4	1,5
Coefficient de conductivité, en kcal/m·h·°C	0,05—0,08	0,04—0,05
Absorption d'eau, en %	jusqu'à 120	jusqu'à 100

La matière première servant à la fabrication des plaques de liège étant déficitaire, on n'emploie ces plaques que pour calorifugeage du matériel frigorifique.

Les plaques en liège doivent être protégées contre l'humidité.

§ 2. MATÉRIAUX ISOLANTS MINÉRAUX

a) Laine minérale ; pièces en laine minérale

La laine minérale est un matériau isolant constitué par des fibres séparées que l'on obtient par fusion de certaines roches ou de certains laitiers.

Les matières premières employées pour fabriquer la laine minérale sont les suivantes : marne, schiste, mélange de calcaire et de dolomite avec des roches argileuses et siliceuses, et enfin les laitiers (de préférence de hauts fourneaux). On réserve plutôt le nom de laine minérale aux fibres obtenues à partir des roches ; les fibres obtenues à partir des laitiers sont appelées laine de laitiers.

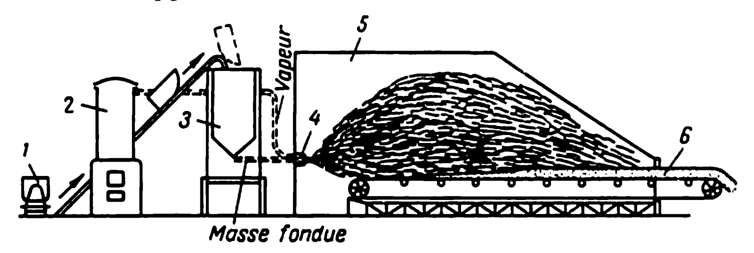


Fig. 144. Schéma d'une installation de fabrication de laine minérale : *1* — caisson à combustible et matières premières ; *2* — chaudière à vapeur : *3* — cubilot (cuve) ; *4* — éjecteur-pulvérisateur ; *5* — compartiment de formation des fibres ; *6* — laine minérale déposée sur la courroie d'un transporteur

La fabrication de la laine minérale comprend essentiellement les deux opérations suivantes : 1) fusion du mélange brut ; 2) transformation de la masse fondue en fibres.

On fait fondre la matière première, généralement dans des fours à fosse ou cubilots, d'une hauteur de 3 à 6 m et d'un diamètre intérieur de 0,75 à 1,5 m. La masse fondue, s'écoulant du pied du four par une ouverture de 20 à 30 mm de diamètre, est pulvérisée en gouttelettes par la pression du jet de vapeur ou de l'air comprimé. Pendant leur propagation à travers le compartiment de formation des fibres, ces gouttelettes s'allongent et se transforment en fibres très minces de 2 à 60 mm de longueur et de 2 à 12 microns de diamètre. Ces fibres se déposent sur le plancher du compartiment, constitué par un transporteur progressant à une vitesse déterminée. Les fibres forment sur ce transporteur une couche de laine qui prend l'aspect d'un ruban. A la sortie du compartiment, le ruban passe entre des rouleaux qui le compriment légèrement. La figure 144 représente schématiquement une installation de fabrication de laine minérale. Au cours de l'opération, les gouttelettes fondues ne sont pas toutes transformées en fils allongés ; certaines d'entre elles prennent des formes régulières de sphérules,

de bâtonnets, etc. Ces granules (fig. 145) accroissent la masse volumique et le coefficient de conductivité de la laine minérale. Aussi, leur teneur ne doit pas dépasser 25% dans le produit fini.

En fonction de la masse volumique (qui dépend à son tour du diamètre des fibres, du degré de compression et de la proportion des granules), on distingue trois marques ou qualités : 150, 200 et 250. Le coefficient de conductivité de la laine minérale varie entre 0,04 et 0,06 kcal/m·h·°C. La laine minérale ne brûle pas, résiste bien au gel et est faiblement hygroscopique. On n'utilise presque pas la laine minérale dans le bâtiment, parce qu'elle est très fragile et qu'elle dégage beaucoup de poussière quand on la met en place. On évite cet inconvénient dans la laine minérale granulée, c'est-à-dire transformée en des granulés sans cohésion. On emploie ce dernier produit comme remplissage calorifuge des murs en corps creux et isolant des planchers.

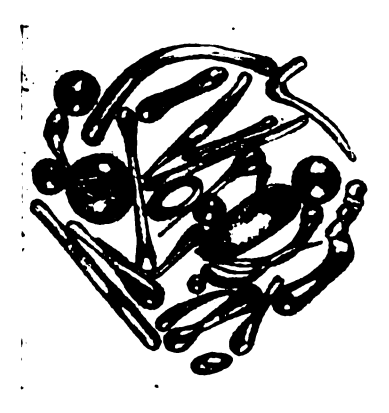


Fig. 145. Granules non transformés en fibres minérales

On fabrique la laine minérale granulée dans des granuleuses constituées par deux cylindres dentés sous lesquels se trouvent les cylindres cribleurs. En passant entre les cylindres rotatifs, la laine se rompt en morceaux de 15 à 25 mm qui tombent sur le crible où ils se transforment en boules.

Au cours de la granulation, les granulés contenus dans la laine minérale fibreuse sont criblés, ce qui améliore la qualité de la laine. La laine granulée mélangée à l'amiante et aux liants (ciment Portland, verre liquide, etc.) est employée dans la fabrication des mastics isolants.

Les produits finis les plus répandus que l'on fabrique avec la laine minérale sont le feutre minéral, les paillasses de laine minérale et le liège minéral.

Le feutre minéral est un produit en rouleaux ou en feuilles que l'on obtient en comprimant la laine minérale imprégnée par des liants organiques (bitume ou résine synthétique).

Pour fabriquer le feutre minéral, on emploie du bitume de pétrole fondu, marque БН-IV, ou bien une solution de résine phénol-formaldéhyde, et l'on asperge avec ces produits les fibres de la laine minérale au cours de leur formation dans le compartiment. Les fibres sont enrobées ainsi d'une mince pellicule de liant. En sortant du compartiment, la couche de feutre se déplaçant sur le transporteur est comprimée par des cylindres.

Le feutre à liant bitumineux est ensuite refroidi, puis sectionné en feuilles de dimensions voulues par des scies circulaires. Lorsque le liant est une résine synthétique, le feutre comprimé est envoyé tout d'abord dans des compartiments de séchage, où on le réchauffe jusqu'à 130-160 °C avec de l'air chaud. Sous l'effet de la chaleur, la résine durcit et agglomère les fibres.

Les feuilles de feutre minéral ont les dimensions suivantes : 100-300 cm de longueur, 37,5-120 cm de largeur, 20, 40 et 60 mm d'épaisseur. Le tableau 33 indique les principales caractéristiques physico-mécaniques de ce produit.

Tableau 33

Caractéristiques physico-mécaniques du feutre minéral

Caractéristiques	Feutre à liant bitumineux	Feutre à résine synthétique
Masse volumique, en kg/m³ . . .	150—200	100 au plus
Coefficient de conductivité, en kcal/m·h·°C	0,05—0,06	0,035—0,04
Résistance limite à la traction, en kg/cm²	0,08—0,14	0,05—0,2
Absorption d'eau en 24 heures en %, au plus	400	700

La proportion de liant dans le feutre est de 2 à 5% pour le bitume, et de 4 à 8% pour les résines synthétiques.

On emploie le feutre minéral pour isoler les murs et les couvertures ainsi que les conduites et le matériel technologique des entreprises industrielles. Les températures limites d'emploi sont les suivantes : pour un feutre à liant bitumineux, +60 °C (à l'intérieur d'un bâtiment) et +200 °C (à l'extérieur) ; pour un feutre à résine synthétique, +200 °C.

On obtient les panneaux de laine minérale en transfilant une couche de laine minérale recouverte d'un papier bitumé sur l'une ou sur ses deux faces. Le transfilage se fait sur des machines spéciales, parallèlement aux longs côtés du rouleau et sur au moins six lignes.

Dimensions des panneaux : longueur 100-300 cm ; largeur 50-100 cm ; épaisseur 3 et 5 cm. On peut fabriquer des panneaux plus grands qui alors sont enroulés pour constituer des rouleaux de feutre.

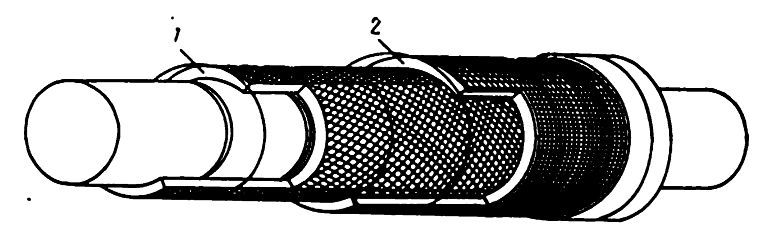


Fig. 146. Isolation d'un tuyau avec des coquilles de laine minérale et un grillage métallique :
1 — première couche de coquilles ; 2 — deuxième couche de coquilles

La masse volumique des panneaux de laine minérale ne dépasse pas 250 kg/m³ ; le coefficient de conductivité — 0,06 kcal/m·h·°C. La température maximale d'emploi est +100 °C. Ces panneaux servent à isoler les murs et couvertures des immeubles d'habitation et bâtiments industriels, le matériel technologique. Les coquilles servent d'isolation aux conduites (fig. 146).

Le liège minéral se présente en plaques dures de laine minérale que l'on obtient en mélangeant la laine minérale avec une émulsion de bitume ou des résines synthétiques, et en moulant ensuite sous pression la masse ainsi obtenue. (Ces plaques minérales rappellent le liège naturel par leurs propriétés, ainsi que par leur couleur, lorsque le liant est du bitume ; c'est pourquoi on les appelle du liège minéral.) Ces plaques sont fabriquées aux dimensions suivantes : longueur 50 et 100 cm ; largeur 50 cm ; épaisseur 4 à 5 cm ; masse volumique 300 à 400 kg/m³ ; coefficient de conductivité 0,06 à 0,07 kcal/m·h·°C ; résistance minimale à la flexion 1,5 kg/cm².

Le liège minéral résiste bien à l'eau et est faiblement hygroscopique. Les plaques fabriquées avec des résines synthétiques peuvent être employées jusqu'à +130 °C,

alors que les plaques à émulsion bitumineuse ne peuvent pas être employées au-delà de +70 °C. Le liège minéral peut remplacer le liège naturel, qui coûte cher. On l'emploie pour isoler le matériel frigorifique, comme isolation thermique et phonique des murs et couvertures des immeubles d'habitation et bâtiments industriels. La laine minérale et particulièrement les pièces fabriquées avec cette laine sont actuellement les isolations les plus efficaces, grâce à leur pouvoir isolant thermique élevé, la simplicité de leur procédé de fabrication et au fait que les réserves d'approvisionnement sont illimitées.

b) Laine de verre sous ses formes multiples

La laine de verre est un matériau fibreux constitué par des fils de verre fins et souples, que l'on obtient par fusion d'une masse vitreuse (fig. 147).

Pour fabriquer la laine de verre, on emploie le verre cassé ou bien les matières premières servant à la fabrication du verre ordinaire : silice naturelle, soude calcinée et sulfate de sodium.

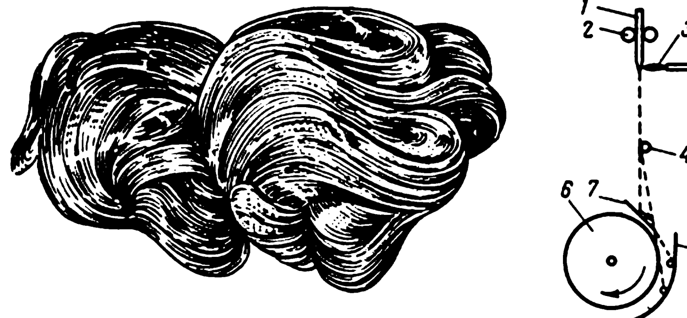


Fig. 147. Laine de verre

Fig. 148. Schéma du procédé de fabrication des fibres de verre par baguette de verre :
1 — baguette de verre ; 2 — galets de débit ; 3—brûleur à gaz ; 4 — dispositif faisant varier l'angle de chute de la gouttelette ; 5 — plaque de renvoi de la gouttelette ; 6—cylindre ; 7—écran

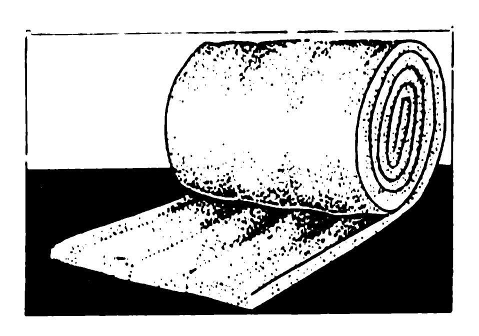


Fig. 149. Rouleau de feutre de laine de verre

Le verre cassé ou le mélange brut sont mélangés dans des fours de fusion du verre. Ensuite, la masse fondue est extrudée en fils fins par les ouvertures ou filières et les fils obtenus sont enroulés sur un tambour tournant à grande vitesse (fabrication par filière). Ce procédé permet d'obtenir des fils très longs (jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres) et très fins (jusqu'à 0,1 micron).

Dans le procédé par soufflage, on obtient des fibres grossières et courtes, en pulvérisant la masse fondue par un jet de vapeur ou de gaz chaud sous haute pression.

On fabrique également les fibres de verre par le procédé de la baguette (fig. 148). Dans ce procédé, on chauffe une baguette jusqu'à fusion au moyen de brûleurs spéciaux. La goutte de verre qui se détache et tombe entraîne à sa suite des fibres fines qui s'enroulent sur un cylindre rotatif.

A l'état non comprimé, la masse volumique de la laine de verre ne dépasse pas 150 kg/m^3, et le coefficient de conductivité ne dépasse pas 0,045 $kcal/m \cdot h \cdot °C$.

Les fibres de verre sont beaucoup plus longues que celles de laine minérale. La laine de verre résiste mieux aux agents chimiques, et sa conductivité est plus faible. Par contre, elle se détériore rapidement à haute température et dans une humidité élevée.

Comme isolation thermique, on emploie surtout la laine minérale sous ses formes multiples : paillasses, rouleaux de feutre, bourrelets, panneaux, coquilles et pièces de diverses formes maintenues par un grillage en fil métallique. On emploie surtout les rouleaux de feutre et les bourrelets fabriqués par transfilage d'une masse de laine de verre recouverte sur ses deux faces d'une couche de fibres de verre

(croûte) de 1,5 mm d'épaisseur. Cette croûte consolide les fibres des couches extérieures et protège la pièce contre les détériorations en cours de transport ou de montage. Le transfilage des rouleaux de feutre et des bourrelets se fait avec des fils d'amiante ou des fils en fibre de verre.

Les pièces destinées à isoler des surfaces jusqu'à +100 °C peuvent être transfilées avec du fil de coton. La fig. 149 montre un rouleau de feutre en laine de verre transfilée. On produit également des rouleaux de feutre non transfilés. Dans ce cas on donne aux pièces la forme et la résistance voulues à l'aide de certains liants (amidon, résines synthétiques).

Les rouleaux de feutre et bourrelets en laine de verre sont employés pour l'isolation des équipements industriels les plus sérieux, les installations thermiques et les tuyauteries quand la température des surfaces à isoler ne dépasse pas +450 °C. Dans la construction de logements, ils servent d'isolation thermique et phonique des murs et couvertures.

c) Verre cellulaire

On appelle verre cellulaire un verre dont la structure est poreuse (cellulaire).

On fabrique ce produit en mélangeant le verre avec une substance génératrice de gaz, puis en faisant fondre ce mélange et en le refroidissant. Pour fabriquer le verre cellulaire, on emploie surtout le verre cassé. La substance génératrice de gaz est du calcaire broyé, du charbon, etc., sa température de décomposition devant excéder de 150 ou 200 °C la température de fusion du verre.

Le verre cassé finement broyé est mélangé soigneusement avec la matière génératrice de gaz. Ensuite, on verse le mélange dans le moule, et l'on chauffe. Au cours du chauffage, les particules de verre fondent tout d'abord, puis la substance génératrice de gaz se décompose. Le gaz qui se dégage fait gonfler la masse vitreuse, et forme de nombreux pores dans cette masse. Après refroidissement, on obtient une matière résistante de structure cellulaire.

Les principales pièces fabriquées en verre cellulaire sont des blocs et des plaques. Cette matière a une masse volumique comprise entre 150 et 600 kg/m^3 et sa conductivité varie en fonction de la masse volumique entre 0,05 et 0,11 kcal/m·h·°C.

La résistance mécanique élevée du verre cellulaire est ce qui distingue essentiellement ce matériau des autres isolations. La résistance limite à la compression du verre cellulaire varie de 20 à 150 kg/cm² en fonction de la masse volumique. Le verre cellulaire résiste bien à l'eau et au gel et est incombustible. Il se scie et se découpe aisément. On peut également y enfoncer des clous. En ajoutant à la masse de verre liquide des colorants minéraux, on peut obtenir des verres cellulaires de diverses couleurs.

Le verre cellulaire est une isolation thermique et phonique extrêmement efficace. On peut l'employer pour l'isolation des murs et des planchers, des sols et des combles des bâtiments industriels et édifices publics. Il sert également à isoler les chambres froides et les surfaces chaudes des installations de chauffage.

d) Matériaux à base d'amiante

L'amiante est la principale matière première employée dans la fabrication des isolations thermiques destinées à protéger efficacement les surfaces chaudes. A l'aide de ces isolations, on calorifuge les chaudières, les autoclaves, les tuyauteries et autres équipements industriels.

Pour fabriquer les isolations, on emploie principalement l'*amiante chrysotile*, ou amiante serpentine. Cette préférence tient à ce que les fibres de l'amiante chrysotile sont plus résistantes et plus élastiques que celles des autres variétés d'amiante (crocidolite ou amiante bleue, amozite, etc.). Par ailleurs, elles sont moins énergiquement liées entre elles et peuvent se désagréger plus facilement. Les réserves naturelles d'amiante chrysotile excèdent de beaucoup celles de l'ensemble de toutes les autres variétés.

Les usines de fabrication des isolations sont alimentées en amiante enrichi, c'est-à-dire séparé des roches (minerai d'amiante) et en partie broyé. L'amiante enrichi est un mélange de petites touffes de fibres et de fibres séparées de diverses longueurs. La désagrégation totale de l'amiante est la première opération du procédé de fabrication de tous les matériaux à base d'amiante.

La désagrégation de l'amiante se fait dans des broyeurs comprenant deux meules lourdes roulant en cercle dans une cuve fixe.

A partir de l'amiante broyé, on peut réaliser des isolations légères, élastiques et néanmoins résistantes, qui

ont une faible conductivité thermique et résistent bien à la chaleur jusqu'à 500 °C.

Les produits à base d'amiante peuvent être pulvérulents ou constituer des pièces plates ou courbes. On les fabrique également en rouleaux. La fig. 150 montre des coquilles et des segments.

On distingue deux groupes de matériaux à base d'amiante d'après leur composition : l'amiante proprement dit,

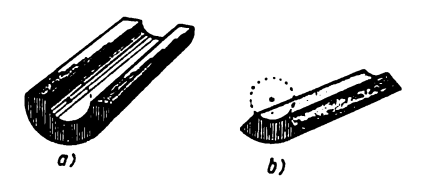


Fig. 150. Coquille (*a*) et segment (*b*)

qui ne contient que des fibres d'amiante, et les produits à teneur d'amiante, qui contiennent également d'autres composants ayant les propriétés des liants.

Amiante proprement dit

Le papier d'amiante est un matériau en feuilles ou en rouleaux, que l'on fabrique avec de l'amiante additionné d'une faible quantité de matière collante (généralement au maximum 5% d'amidon en poids de l'amiante). On broie l'amiante par voie humide, puis, avec la masse ainsi obtenue, on fabrique les feuilles sur une machine à mouler les feuilles.

La masse volumique du papier d'amiante varie de 450 à 950 kg/m^3, en fonction du degré de broyage de l'amiante et de la compression de la masse dans la machine à mouler les feuilles.

La conductivité est de 0,11 à 0,15 kcal/m·h·°C à 0 °C et de 0,12 à 0,17 kcal/m·h·°C à 100 °C. La masse volumique et la résistance mécanique du papier d'amiante diminuent quand on chauffe la matière au-delà de 200 °C. Cela tient à la décomposition thermique des colles organiques. Au-delà de 500 °C, les fibres elles-mêmes se détruisent progressivement par suite de la déshydratation de l'amiante (élimination de l'eau de cristallisation.) La température de 500 °C est donc la température maximale d'emploi du papier d'amiante.

On caractérise la résistance mécanique du papier d'amiante par ce qu'on appelle la longueur de rupture (en m), qui est la longueur pour laquelle le papier se déchire sous son propre poids. On calcule cette valeur d'après des résultats d'essais de rupture d'éprouvettes de papier à l'aide d'un dynamomètre. L'épaisseur du papier d'amiante varie de 0,3 à 1,5 mm ; son poids par m^2 varie de 650 à 1 900 g. Son humidité normale ne dépasse pas 3%.

Outre le papier d'amiante lisse, on fabrique également du papier gaufré. Pour cela, on fait passer un papier lisse entre deux cylindres gaufrés et chauds. Le papier gaufré sert à fabriquer le carton d'amiante.

Le *carton d'amiante* est un produit en feuilles fabriqué à partir du papier d'amiante ou des fibres d'amiante mélangées avec une charge (kaolin) et un liant (amidon).

Le papier d'amiante sert à fabriquer le carton d'amiante cellulaire, constitué par des couches alternées de papier lisse et de papier gaufré, qui sont collées au moyen d'une colle ou de verre dissoluble.

On fabrique les feuilles de carton d'amiante cellulaire en dimensions de 100 × 100 cm et en épaisseurs variant de 5 à 50 mm. Suivant l'épaisseur du papier et les dimensions des vides, sa masse volumique varie de 250 à 600 kg/m^3, et son coefficient de conductivité à 50 °C varie de 0,045 à 0,08 kcal/m·h·°C.

A partir des fibres d'amiante et d'une charge, on fabrique le carton d'amiante sur des machines à mouler les feuilles à peu près de la même façon que le papier d'amiante. Les feuilles de carton ont 100 × 100 cm et une épaisseur de 2 à 12 mm. Leur masse volumique est de 900 à 1 000 kg/m^3 et leur coefficient de conductivité de 0,135 kcal/m·h·°C à 0 °C et de 0,157 kcal/m·h·°C à 100 °C. La résistance limite à la rupture du carton d'amiante varie de 7 à 14 kg/cm^2.

On emploie le carton d'amiante en plaques comme isolation thermique des surfaces planes, et le carton d'amiante en coquilles et bourrelets pour calorifuger les tuyauteries.

Produits à teneur d'amiante

Dans ce groupe d'isolations thermiques, on emploie surtout les produits amiante-silice, amiante-calcaire-silice et amiante-magnésie.

Les matériaux amiante-silice sont des mélanges pulvérulents constitués principalement par de l'amiante broyé et des minéraux siliceux, avec ou sans addition de certaines autres substances.

La variété la plus répandue de ces matériaux est l'asbozurite, qui est un mélange d'amiante et de terre d'infusoires ou de diatomite. La proportion d'amiante est de 15 à 30% en poids du mélange sec. La diatomite et la terre d'infusoires des minéraux ont une faible masse volumique. Quand on les mélange à l'eau à l'état finement broyé, elles forment une pâte plastique, qui durcit en séchant.

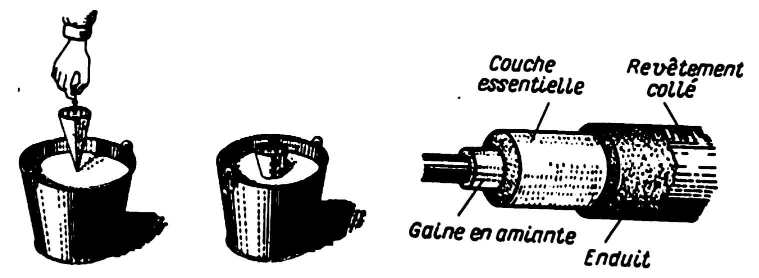


Fig. 151. Détermination de la plasticité d'un mastic

Fig. 152. Isolation thermique d'un tuyau avec un mastic

L'amiante joue le rôle d'une armature et accroît la résistance mécanique de la pâte d'amiante et de terre d'infusoires (ou de diatomite) après son durcissement. On gâche l'asbozurite pulvérulente avec de l'eau, l'on applique le mastic obtenu sur la surface à isoler.

Si la proportion d'eau de gâchage de l'asbozurite est réduite au-dessous de la proportion optimale, le mastic devient trop sec. Il est alors plus difficile de l'appliquer sur la surface à isoler ; mais par contre, la masse volumique de la matière étant réduite après durcissement et dessiccation, ses qualités isolantes sont améliorées.

On estime que le mastic a une consistance normale lorsque le cône étalon s'y enfonce de 10 (+1) divisions.

La fig. 151 montre la façon la plus simple de déterminer la plasticité ou consistance des mélanges amiante-terre d'infusoires (ou diatomite) à l'aide d'un cône métallique étalon. Ce procédé est parfaitement valable en conditions pratiques.

Les principales caractéristiques physico-mécaniques de l'asbozurite employée comme mastic sont les suivantes:

masse volumique 650 à 850 kg/m^3 ; coefficient de conductivité thermique 0,16 à 0,22 kcal/m·h·°C à 100 °C, résistance minimale à la flexion 10 kg/cm^2, résistance à la chaleur jusqu'à +600 °C. Le mastic est appliqué à la main, en couches minces, sur les surfaces chaudes que l'on veut isoler. Pour améliorer l'adhérence de cette matière sur une surface métallique, il faut garnir d'abord le métal d'une gaine d'amiante. Pour éviter les fissurations en cours de séchage, chaque couche de mastic ne doit être appliquée que lorsque la précédente est complètement sèche. L'épaisseur nécessaire de mastic une fois appliquée, on couvre d'abord sa surface d'un enduit de plâtre, pour la protéger contre les coups, puis d'une toile de sac qu'on colle et qu'on peint.

La fig. 152 montre l'isolation thermique d'un tuyau métallique, au moyen d'un mastic. L'emploi de l'asbozurite sous forme de mastic permet d'isoler des surfaces de toute forme ou courbure, mais cette opération demande beaucoup de travail.

Les *matériaux amiante-magnésie* sont essentiellement constitués par un mélange d'amiante et de sels de magnésium et de calcium. Ce groupe de matériaux comprend en particulier la niouvelle et la sovélite.

La *niouvelle* est une matière isolante constituée par un mélange d'amiante et de carbonate de magnésium hydraté souvent appelé magnésie.

Pour fabriquer la niouvelle, on broie la magnésie, on la mélange avec 15% d'amiante, et on la fait passer dans un désintégrateur où elle est broyée une seconde fois. On produit la niouvelle sous forme de poudre, que l'on emploie comme mastic calorifuge, ou bien en plaques ou coquilles. Les échantillons moulés et séchés de niouvelle ont les caractéristiques suivantes : masse volumique maximale 350 kg/m^3, coefficient de conductivité 0,07 kcal/m·h·°C à 50 °C, résistance minimale à la flexion 1,5 kg/cm^2. Comme ce matériau coûte cher et ne résiste pas à une chaleur excédant 250 °C, il est souvent évincé par d'autres isolants non moins efficaces, mais moins chers, et en premier lieu par la sovélite.

La *sovélite* est un mélange d'amiante (15%) avec des carbonates de magnésium et de calcium.

On fabrique la sovélite avec de l'amiante et de la dolomite.

Après cuisson de la dolomite, on obtient une poudre

légère de magnésie contenant une faible quantité de carbonate de calcium non décomposé. Cette poudre a une masse volumique élevée parce qu'elle contient du carbonate de calcium. Par ailleurs, la sovélite résiste mieux à la chaleur que la niouvelle. On gâche la sovélite en poudre avec de l'eau, et le mastic ainsi obtenu est appliqué sur la surface que l'on veut isoler. Il est plus avantageux de fabriquer les pièces de sovélite en usine. On emploie les plaques de sovélite pour isoler les surfaces planes, et les segments et coquilles, pour isoler les surfaces courbes.

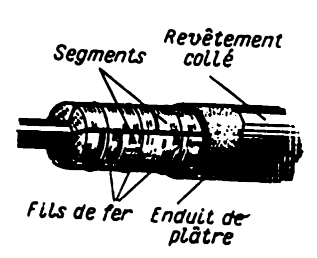


Fig. 153. Isolation thermique d'un tuyau au moyen de segments de sovélite

On fabrique de telles pièces de la façon suivante : on gâche tout d'abord la sovélite pulvérulente avec de l'eau et on la mélange avec de l'amiante préalablement broyé. Le mélange filtré est versé dans des moules métalliques, où il est comprimé sous une basse pression (2 kg/cm^2, au plus). Après moulage, les pièces sont séchées, puis ébarbées. Les déchets et rebuts d'ébarbage sont broyés, et la poudre de sovélite mélangée à l'eau est utilisée pour isoler les surfaces.

Les plaques de sovélite ont 50 cm de longueur, 17 cm de largeur et 30, 40 et 50 mm d'épaisseur. Leur masse volumique n'excède pas 400 kg/m^3 ; leur coefficient de conductivité ne dépasse pas 0,08 kcal/m·h·°C à 100 °C ; leur résistance limite minimale à la flexion est de 1,5 kg/cm^2, et leur température maximale d'emploi est de +500 °C.

Pour isoler une surface avec des segments de sovélite, on applique ces derniers sur une garniture en amiante et une couche de mastic de sovélite. Ensuite, les plaques sont serrées à la surface à isoler par des fils de fer, et les joints entre les plaques comblés par du mastic. La couche isolante est revêtue d'un enduit de plâtre.

La fig. 153 montre un exemple d'isolation thermique d'un tuyau au moyen de segments cylindriques en sovélite. On serre les segments à la tuyauterie avec des fils de fer. Ensuite, on recouvre ces segments d'un enduit de plâtre, revêtu d'une toile à sac, peinte ensuite.

Matériaux amiante-chaux-silice. Le plus employé de ces matériaux est la vulcanite. La vulcanite est un isolant que l'on obtient par moulage et par traitement en autoclave d'un mélange d'amiante (au moins 15%) avec de la chaux éteinte et une roche siliceuse (terre d'infusoires ou diatomite). Exemple de composition de vulcanite : 20% d'amiante, 20% de chaux, et 60% de terre d'infusoires ou de diatomite.

Ce produit doit son nom (vulcanite) au fait que sa composition comprenait initialement des cendres volcaniques. Actuellement, on remplace ces cendres par de la terre d'infusoires ou de la diatomite.

La vulcanite est surtout fabriquée sous forme de plaques. La fabrication de ces plaques comprend les opérations suivantes : préparation du mélange sec, gâchage avec l'eau, moulage, traitement des pièces en autoclave. On moule les plaques dans des moules métalliques, avec des presses hydrauliques et sous une pression ne dépassant pas 1 kg/cm^2.

Au cours du traitement en autoclave de la masse extraite du moule, l'hydroxyde de calcium réagit avec la silice active de la terre d'infusoires ou de la diatomite. Cette réaction est analogue à celle entre la chaux et le sable quartzeux dans la fabrication en autoclave des bétons cellulaires et des briques silico-calcaires. Il se forme de l'hydrosilicate de calcium $CaOSiO_2 \cdot H_2O$, qui augmente la résistance mécanique de la vulcanite. Les plaques de vulcanite peuvent être plates ou incurvées.

Dimensions des plaques planes : longueur 50 cm, largeur 17 cm, épaisseur 20 à 50 mm. Caractéristiques physico-mécaniques principales : masse volumique à l'état sec 400 kg/m^3 au maximum, coefficient de conductivité thermique maximale 0,78 kcal/m·h·°C à 50 °C, résistance minimale à la flexion 3 kg/cm^2, humidité maximale admise 20%.

La température maximale d'emploi des plaques en vulcanite est de +600 °C. L'isolation thermique est réalisée avec les plaques en vulcanite de la même manière qu'avec les plaques en sovélite.

e) Vermiculite et perlite expansées

La *vermiculite expansée* est un matériau isolant pulvérulent que l'on obtient par broyage et courte cuisson (3 à 5 mn) de la vermiculite naturelle. La vermiculite naturelle est un alumino-silicate de magnésium complexe, produit de la transformation d'un mica, essentiellement de la biotite.

Au cours de la cuisson, à 800-1 000 °C, la vermiculite s'expanse et son volume augmente de 20 fois et même davantage. La vermiculite expansée a une très forte porosité, une faible masse volumique, une faible conductivité thermique, et une excellente résistance à la chaleur. Sa masse volumique à l'état pulvérulent dépend des conditions de cuisson et de la grosseur des grains ; elle varie de 80 à 150 kg/m³ à l'état sec. Le coefficient de conductivité thermique entre 100 et 300 °C est de 0,09-0,14 kcal/m·h·°C. La température maximale d'emploi est de 1 100 °C.

Avec un mélange de vermiculite expansée et d'un liant (ciment Portland, argile avec addition d'amidon, etc.) on fabrique des plaques et des coquilles.

La résistance à la chaleur des pièces fabriquées avec la vermiculite expansée dépend de la résistance du liant lui-même à la chaleur. Par exemple, les pièces dont le liant est le ciment Portland résistent jusqu'à 1 000 °C, celles qui contiennent de l'argile et de l'amidon résistent jusqu'à 900 °C, tandis que les mélanges de vermiculite et de résines synthétiques ne résistent pas à une chaleur dépassant 200 °C.

On obtient la *perlite expansée* par une courte cuisson de la perlite broyée, à une température comprise entre 700 et 1 200 °C.

La perlite est une roche siliceuse d'origine volcanique.

La cuisson de la perlite, de même que celle de la vermiculite, se fait dans des fours à cuve ou des fours rotatifs. La masse volumique de la perlite expansée est de 160 à 250 kg/m³; son coefficient de conductivité thermique à 100 °C est de 0,052 kcal/m·h·°C.

On emploie la perlite et la vermiculite expansées comme isolations thermiques et phoniques sous forme d'enduits et de remplissages pulvérulents dans les enveloppes de certains équipements technologiques. Les pièces réalisées avec ces matériaux servent à isoler les voûtes des fours industriels et les tuyauteries importantes.

CHAPITRE XIV

MATÉRIAUX DE FINITION

Les matériaux de finition ont pour destination :

1) de protéger les matériaux principaux des constructions contre les détériorations dues aux agents atmosphériques ou aux vapeurs et gaz nocifs ;

2) d'assurer de bonnes conditions hygiéniques à l'intérieur des locaux (peinture des locaux d'hôpitaux, des écoles, des toilettes) ;

3) d'être décoratifs.

L'emploi des matériaux de finition réalise généralement plusieurs objectifs à la fois. Par exemple, la peinture à l'huile est décorative et protège en même temps le bois contre la pourriture, et les métaux contre la corrosion.

Les matériaux de finition sont extrêmement variés. On les fabrique à partir de matériaux naturels (par exemple les plaques de revêtement en granit pour les soubassements). Ces matériaux peuvent également être céramiques : plaques de parements, carreaux pour revêtements intérieurs. On rencontre également des mortiers de ciment décoratifs. Enfin, on emploie également pour la finition des matériaux en bois (contre-plaqué), des matières plastiques, etc.

Beaucoup de ces matériaux ont déjà été décrits dans différents chapitres de ce manuel. Dans le présent chapitre, nous n'examinerons que trois genres indépendants de matériaux de finition qui n'ont pas été décrits et plus particulièrement, les matières colorantes et vernis, les matériaux collés et le verre.

§ 1. MATIÈRES COLORANTES ET VERNIS

On désigne sous le nom de matières colorantes et vernis les compositions portées à l'état liquide en couches minces sur la surface à peindre ou à vernir. Ces compositions for-

ment une pellicule dure qui adhère énergiquement à cette surface.

Ces matériaux comprennent : les pigments, les liants et dissolvants, les peintures à l'huile, les peintures émail, les peintures à la chaux, à la colle, au silicate et au ciment, et, enfin, les vernis.

a) Pigments

Les pigments sont des poudres colorées et fines, insolubles dans l'eau et dans les dissolvants organiques (huile, alcool, térébenthine), mais qui peuvent former des mélanges homogènes avec ces liquides et donner ainsi des compositions colorées. Les pigments confèrent à la composition la couleur désirée.

On distingue les pigments minéraux et les pigments organiques. Dans le bâtiment, on emploie surtout les pigments minéraux, qui résistent mieux aux agents atmosphériques, aux agents chimiques et à la lumière, facteurs particulièrement importants pour les peintures extérieures.

Les pigments organiques qui résistent à la lumière sont également employés dans le bâtiment pour les peintures intérieures et extérieures. On les fabrique dans les usines de peinture à partir de l'aniline, de la naphtaline, de l'anthracène et d'autres carbures d'hydrogène, sous forme de colorants organiques. Ensuite, on les transforme en pigments en les précipitant à l'état insoluble. Parmi les pigments organiques, on emploie souvent les pigments orange, écarlate et bordeaux, qui ont des couleurs vives et résistent bien à la lumière et à la chaux.

Ne seront considérés dans ce chapitre que les pigments minéraux, beaucoup plus employés dans le bâtiment que les pigments organiques.

D'après leur origine, on distingue les pigments naturels et les pigments artificiels. On obtient les pigments naturels (l'ocre par exemple) par un traitement mécanique simple de roches argileuses contenant des oxydes de fer. On fabrique les pigments artificiels (céruse, jaune de chrome, vert, etc.) dans des usines, parfois par voies chimiques extrêmement complexes.

La qualité d'un pigment est déterminée par les caractéristiques principales suivantes : pouvoir couvrant, pouvoir colorant, finesse de mouture, résistance à la lumière, aux

agents chimiques et aux agents atmosphériques, résistance au feu, affinité envers l'huile.

Le pouvoir couvrant d'un pigment est défini par la quantité de pigment nécessaire pour peindre 1 m^2 de surface. Pour déterminer le pouvoir couvrant d'un pigment, on emploie des peintures ayant la même consistance que celle des peintures employées dans la pratique ; on dilue ce pigment dans un siccatif, et la peinture ainsi obtenue est portée sur une plaque de verre dont la face opposée porte une bande blanche et une noire. On peint cette plaque jusqu'à ce que ces bandes ne soient pas distinguables en lumière réfléchie, ceci en posant la plaque sur une feuille de papier blanc. On évalue la consommation en peinture, c'est-à-dire le pouvoir couvrant, par la différence des poids de la plaque de verre avant et après application de la peinture. Le pouvoir couvrant varie très largement d'un pigment à l'autre (de 10 à 200 g/m^2).

Le pouvoir colorant, ou intensité d'un pigment, est le pouvoir que possède ce pigment de transmettre sa couleur quand on le mélange avec d'autres pigments blancs, noirs et bleus. Il ne faut pas confondre le pouvoir colorant et le pouvoir couvrant. Le bleu de Prusse par exemple est un pigment faiblement couvrant mais très intense, car il donne une teinte bleue à l'huile même à un rapport jusqu'à 1 : 1 000.

La finesse de mouture d'un pigment a une grande influence à la fois sur le pouvoir couvrant et sur l'intensité de ce pigment. Le pouvoir couvrant et l'intensité sont en effet d'autant plus grands que les particules sont plus fines. Une finesse de mouture trop poussée peut pourtant réduire le pouvoir couvrant.

La finesse de mouture a également une grande influence sur l'endurance des pellicules de peintures. Les pellicules dans lesquelles les grains de pigment ont une grosseur supérieure à 10 microns se détériorent plus rapidement, ceci parce que la surface rugueuse d'une telle pellicule retient l'humidité et que celle-ci fait gonfler la pellicule et finit par la détériorer.

On détermine la finesse de mouture par tamisage humide et sec à travers des tamis normalisés dont les numéros sont définis par la norme soviétique correspondante pour chaque catégorie de pigments.

La résistance à la lumière est le pouvoir

que possède un pigment de conserver sa couleur sous l'action de la lumière. C'est là une propriété importante des pigments, en particulier pour ceux, employés dans les peintures extérieures (façades). On détermine la résistance à la lumière de deux façons : en laboratoire avec des appareils spéciaux, en conditions naturelles.

En laboratoire, on soumet les échantillons à l'action du flux lumineux émis par des lampes spéciales, et l'on observe la modification de la couleur initiale du pigment. En conditions naturelles, on soumet les échantillons de peinture à l'action de la lumière solaire et l'on compare ces échantillons avec les échantillons de référence conservés dans l'obscurité. On évalue le degré de résistance à la lumière d'après la modification de la couleur.

La *résistance aux agents atmosphériques* est le pouvoir que possède un pigment de résister à l'action simultanée des variations de température, de lumière, d'humidité, de teneur en gaz carbonique, etc. Cette propriété est importante pour les pigments employés dans les peintures extérieures. Le minium de plomb et le minium de fer, la céruse, le vert de chrome, etc., résistent bien aux agents atmosphériques.

L'*affinité envers l'huile* d'un pigment est la quantité d'huile qu'il faut ajouter à ce pigment pour obtenir une pâte colorée. Il faut une faible quantité d'huile pour certains pigments (céruse par exemple), alors qu'une forte quantité est nécessaire pour d'autres (noir de carbone). La résistance ou endurance d'une couleur est d'autant plus grande que la quantité d'huile nécessaire pour obtenir la pâte colorée est plus faible, car la couche colorée est détériorée principalement par suite de la destruction de la pellicule d'huile.

Le *pouvoir anticorrosif* d'une peinture est le pouvoir que possède cette peinture pour protéger les métaux ferreux contre la rouille. Les pigments employés pour peindre les métaux (radiateurs, tuyaux, etc.) ne doivent pas contenir de substances provoquant la rouille des métaux ferreux. La céruse, le minium de plomb, le minium de fer, le jaune de zinc, le vert de zinc et la poudre d'aluminium ont d'excellentes propriétés anticorrosives. Au contraire, certains autres pigments (par exemple le noir de carbone et le rouge de Prusse artificiel) favorisent la corrosion des métaux ferreux.

Dans la caractéristique sommaire qui suit, les pigments sont classés d'après leur couleur.

Pigments blancs

On emploie beaucoup les pigments blancs pour peindre les intérieurs car la peinture blanche augmente la clarté des locaux. Dans de nombreux cas, la peinture blanche est prescrite par les règlements sanitaires et d'hygiène. On ajoute des pigments blancs à d'autres pigments, en vue d'éclaircir les couleurs. Si l'on mélange par exemple un pigment rouge avec un pigment blanc, on obtient une couleur rose. Si l'on mélange un pigment bleu avec un pigment blanc, on obtient un pigment bleu pâle.

Les pigments blancs peuvent être naturels ou artificiels. La c h a u x est un des pigments naturels les plus employés. Dans les travaux de peinture, il est préférable d'employer une *craie sans sable* et qui ne comprend que des particules très fines.

La craie ne convient que pour les peintures à l'eau, à la colle ou à la caséine. Avec une huile, elle donne une pellicule jaune sale semi-transparente.

Parmi les pigments blancs artificiels, on emploie beaucoup le blanc de neige, le blanc de titane et le lithopone (mélange de sulfate de baryum et de sulfure de zinc).

Les b l a n c s d e n e i g e. On obtient l'oxyde de zinc (ZnO) en partant du zinc métallique ou d'un minerai de zinc. Dans ce but, on vaporise le métal à haute température, puis on oxyde la vapeur par l'oxygène de l'air dans des chambres spéciales.

Le blanc de neige est soluble dans les bases et les acides. L'action des combinaisons sulfureuses ne modifie pas la couleur du blanc de neige, car le sulfure de zinc (ZnS) qui se forme est également blanc.

Le blanc de neige résiste mal aux agents atmosphériques. On l'emploie principalement pour les intérieurs, sur bois, métal ou enduits.

Le l i t h o p o n e est un mélange de sulfure de zinc et de sulfate de baryum. Il se dissout dans les acides, avec dégagement d'acide sulfhydrique. Il noircit à la lumière, résiste mal aux agents atmosphériques, et ne protège pas l'acier contre la corrosion. On l'emploie surtout dans les travaux intérieurs, sous forme de peinture à l'huile ou de peinture émail.

On prépare le blanc de plomb ou céruse, qui a pour formule $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$, en faisant passer du gaz carbonique dans une solution d'acétate basique de plomb. La céruse se dissout dans les acides, avec dégagement de gaz carbonique. Elle se noircit sous l'action de l'acide sulfhydrique. Il ne faut donc pas l'employer mélangée avec des pigments qui contiennent du soufre.

La céruse a un très grand pouvoir couvrant et résiste bien à la lumière et aux agents atmosphériques. Elle est donc indiquée pour les peintures extérieures. Ses propriétés anticorrosives sont remarquables. La céruse protège bien les métaux. La céruse étant toxique, on ne la fournit aux usagers que sous forme de peinture à l'huile prête à être employée. On ne doit pas l'utiliser pour les peintures intérieures.

Le blanc de titane est un bioxyde de titane TiO_2 ou un mélange de 25 à 75% de bioxyde de titane avec de l'oxyde de zinc et une charge. On obtient le bioxyde de titane à partir des minerais qui contiennent ce métal, en décomposant ces minerais par l'acide sulfurique.

Le blanc de titane n'est pas soluble dans les bases et les acides ; il n'est pas modifié par les combinaisons sulfurées ; il résiste bien aux agents atmosphériques et à la lumière. On l'emploie pour les peintures intérieures et extérieures. Comparé au blanc de plomb, il a l'avantage de ne pas être toxique.

Pigments jaunes

Parmi les pigments jaunes, on utilise surtout dans la peinture un pigment naturel — l'ocre et des pigments artificiels — le jaune de plomb et le jaune de neige.

L'ocre est un pigment naturel composé d'argile et d'oxydes de fer qui lui donnent diverses teintes. L'ocre contient souvent des oxydes de manganèse, qui lui confèrent une teinte foncée. La proportion d'oxydes de fer dans l'ocre varie de 20% à 25%. L'ocre est un des pigments les plus stables et les moins chers qui résistent bien à la lumière et aux bases. On l'emploie sous forme de peintures à la colle, à l'huile, à la caséine, de peintures émails, etc.

Le jaune de plomb, qui est du chromate de plomb $PbCrO_4$, résulte de l'action du chromate rouge sur des sels

de plomb. C'est une substance toxique. Les teintes du jaune de plomb varient du jaune citron au jaune foncé selon sa structure et la proportion de sulfate de plomb. Il noircit sous l'effet de l'acide sulfhydrique, et il rougit sous l'effet des bases. Il a un grand pouvoir couvrant et possède également de hautes propriétés anticorrosives.

Les jaunes de plomb sont employés principalement comme peintures à l'huile et peintures laques sur métaux et bois.

Pigments bleus

Parmi les pigments bleus, on utilise beaucoup l'outremer et le bleu de Prusse.

On obtient l'o u t r e m e r en chauffant un mélange de kaolin, de soufre, de sel de Glauber, de charbon et de terre d'infusoires. Sa couleur varie du bleu clair à un bleu cuivré, en fonction des composants employés. L'outremer n'est pas toxique et résiste bien à la chaux et aux bases. Il est détruit par les acides, en dégageant de l'acide sulfhydrique, indice qui permet de le distinguer du bleu de Prusse.

On emploie l'outremer comme couleur de soutien pour faire disparaître la nuance jaunâtre dans les peintures à l'huile blanches et les peintures de blanchiment à la colle.

Le b l e u d e P r u s s e est un sel de fer de l'acide ferrocyanhydrique. On l'obtient en faisant réagir des solutions de ferrocyanure de potassium et de sulfate de fer, puis en oxydant le précipité blanc. On produit le bleu de Prusse en morceaux et en poudre.

A l'état pur, le bleu de Prusse résiste bien à la lumière ; mais il se décolore quand il est mélangé à du blanc de neige, et surtout à du blanc de titane. Ses propriétés anticorrosives sont satisfaisantes.

On emploie le bleu de Prusse en utilisant comme liants des huiles et des laques. Il ne convient pas pour les peintures sur des enduits et mortiers de ciment, parce qu'il est détérioré par la chaux et les bases, en donnant un précipité brun, indice qui permet de le distinguer de l'outremer.

Pigments verts

Les pigments verts employés dans le bâtiment sont extrêmement variés. On emploie surtout le vert de plomb et de chrome, l'oxyde de chrome et le vert de zinc.

Le vert de plomb et de chrome est un mélange mécanique de jaune de chrome, de bleu de Prusse et d'une charge.

En fonction de la couleur et de la composition, on distingue trois sortes de verts de plomb, et deux teintes pour chaque sorte — claire et foncée.

Les propriétés techniques du vert de plomb sont analogues à celles du jaune de plomb, qui est prédominant dans sa composition (en particulier, dans les sortes claires). De même que le jaune de plomb, le vert possède un grand pouvoir couvrant, une forte intensité et d'excellentes propriétés anticorrosives.

Comme le vert de plomb contient des combinaisons du plomb, il noircit sous l'action de l'acide sulfhydrique et des gaz sulfurés. Il résiste assez bien à la lumière. Il se détériore en milieu basique. Il ne convient donc pas pour les peintures à la chaux et les peintures à la colle sur enduits.

On emploie généralement le vert de plomb sous la forme de peinture à l'huile. Il n'est pas avantageux de l'employer dans les peintures à la colle, parce qu'il coûte cher et qu'il est lourd.

On prépare l'oxyde de chrome Cr_2O_3 en chauffant un mélange de bichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$ pulvérisé avec un réducteur quelconque (poudre de charbon de bois ou de soufre). L'oxyde de chrome est un pigment minéral qui est chimiquement inerte et qui n'est pas modifié par les acides, les bases et les combinaisons sulfurées. Il résiste bien à la lumière et à la chaleur. On peut mélanger l'oxyde de chrome avec tout pigment, indépendamment de sa composition chimique, ainsi qu'avec tous les liants possibles : huiles, laques, liants calcaires, colles et émulsions.

Comme l'oxyde de chrome résiste bien à la chaleur, aux acides et aux bases, on l'emploie pour peindre les surfaces chauffées, les locaux pour accumulateurs et les locaux soumis à l'action des eaux agressives (usines chimiques), etc.

Pigments rouges

Les pigments rouges les plus employés dans la peinture sont les suivants : rouge de Prusse naturel, rouge de Prusse artificiel, minium de plomb.

Le rouge de Prusse naturel a diverses nuances de rouge. C'est une fine poudre d'argile, colorée par des oxydes de fer. La proportion de ces oxydes ne doit pas être inférieure à 35%.

Le rouge de Prusse naturel est bon marché. On peut donc l'utiliser comme peinture à l'huile, comme peinture à la colle sur métaux, sur bois ou sur enduits. Il résiste très bien à la lumière.

Le rouge de Prusse artificiel est un mélange de sulfate de calcium calciné et d'oxyde de fer. On l'obtient en calcinant du sulfate ferreux avec de la craie ou un calcaire. Ce produit peut être de couleurs claire ou foncée. Il résiste bien à la lumière, a une forte intensité et un pouvoir couvrant élevé. On l'emploie dans tous les genres de peintures sur bois ou enduits, mais jamais sur métaux.

On obtient le minium de plomb en calcinant de la litharge (monoxyde de plomb) à 450 °C. Sa couleur varie de l'orange au rouge. Ce corps est le plus lourd des pigments. Sa masse volumique varie de 8,32 à 9,16. Il résiste bien aux bases, mais il est soluble dans les acides. Il protège bien l'acier contre la corrosion.

On emploie le minium de plomb exclusivement sous forme de peinture à l'huile. Il sert principalement comme couche de fond anticorrosive sur les aciers exposés longtemps à l'action de l'eau. On l'emploie également comme matière d'étanchéité sur les filetages des raccords tubulaires, ou encore dans les joints à brides.

Pigments bruns

Parmi les pigments bruns, on utilise surtout le minium de fer, et en deuxième lieu le pigment appelé terre de Sienne.

Le minium de fer est un pigment que l'on obtient en broyant finement certains minerais de fer. Son composant principal est un oxyde de fer de couleur brune. Ce minium d'une couleur très intense résiste bien à toutes les actions. On l'emploie souvent pour peindre les couvertures en tôle.

La terre de Sienne est une argile colorée par des oxydes de fer et de manganèse. La proportion des oxydes de fer et des oxydes de manganèse ne doit pas être respectivement inférieure à 48% et 7-14%.

La terre de Sienne a une couleur brune avec une nuance verdâtre. Après calcination, elle prend une teinte rouge-brun (terre de Sienne brûlée). On l'emploie surtout dans les peintures à la colle et plus rarement dans les peintures à l'huile. La présence d'oxydes de manganèse dans la terre de Sienne accélère le séchage des peintures à l'huile.

Pigments noirs

En peinture, les pigments noirs sont utilisés tant à l'état pur qu'en mélange avec des pigments blancs, pour obtenir les couleurs grises. Parmi les pigments noirs, on utilise surtout la suie ou noir de carbone, le bioxyde de manganèse et le graphite.

La suie est un produit de la combustion des substances organiques. On distingue la suie (ou noir de carbone) de flamme, de lampe ou de gaz. On obtient le noir de flamme en faisant brûler une substance organique solide (bois, anthracène) en présence d'un faible flux d'air. On obtient le noir de lampe par combustion d'une matière liquide (huile de pétrole ou huile provenant de la distillation de la houille). Enfin, on obtient le noir de gaz par la combustion de l'acétylène et de certains autres gaz.

Les noirs de carbone sont les pigments les plus légers : leur masse volumique varie de 1,70 à 2,25. Ils ont un fort pouvoir couvrant, une grande intensité, et résistent bien aux acides et aux bases. On les emploie dans les peintures à l'huile, les peintures au vernis, les peintures à la chaux et les peintures à la colle.

Le bioxyde de manganèse MnO finement broyé donne un pigment noir de pouvoir couvrant variable. On l'obtient à partir du minerai naturel de manganèse. Il est utilisé dans les travaux de peinture : peinture des soubassements, des grilles en fonte, etc. Ayant une grande masse volumique, il se mélange bien avec les colorants naturels dans les peintures composées.

Le graphite est un produit naturel de couleur gris foncé présentant un éclat métallique gras. Les meilleures variétés de graphite contiennent jusqu'à 92% de carbone. Il est remarquable par sa résistance à la chaleur et aux acides. On l'emploie dans les peintures à l'huile.

b) Dissolvants et liants

Les liants servent à agglomérer les particules pigmentaires entre elles et à les faire adhérer énergiquement à la surface sur laquelle elles sont appliquées.

On peut classer les liants en trois groupes : les h u i l e s qui comprennent les huiles cuites de lin et les vernis huileux, les c o l l e s fabriquées à l'aide d'eau et de colle proprement dite, et les é m u l s i o n s que l'on obtient en mélangeant une huile avec de l'eau en présence d'un émulsificateur.

Pour donner aux couleurs la consistance nécessaire, on leur ajoute des diluants.

L'eau est le diluant que l'on emploie pour les liants du genre des colles. Pour les huiles et les vernis, on emploie les huiles cuites, la térébenthine, la pétrole de laque, un pétrole spécial (le solventnaphta) et d'autres dissolvants organiques volatils.

Huiles siccatives

On distingue les huiles siccatives naturelles, semi-naturelles et artificielles.

Les h u i l e s s i c c a t i v e s n a t u r e l l e s résultent du traitement de certaines huiles végétales par chauffage jusqu'à 200 °C (huile de lin, de chènevis, d'abrasin*). Pour accélérer la dessiccation à la cuisson, on ajoute des substances siccatives (sels ou oxydes de plomb, de cobalt, de manganèse, etc.).

Les pellicules des huiles siccatives naturelles ont, après durcissement, une très grande plasticité et résistent parfaitement aux agents atmosphériques.

Les huiles siccatives appliquées en couches minces durcissent à l'air (on dit qu'elles sèchent). Cela tient à ce qu'elles sont oxydées par l'oxygène de l'air, ce qui a pour effet de polymériser leurs molécules. Les huiles siccatives sèchent beaucoup plus lentement dans l'obscurité, quand la température de l'air tombe ou son humidité s'élève. Par contre, le phénomène est plus rapide si l'on ajoute des siccatifs aux huiles.

Les huiles siccatives naturelles contenant des huiles végétales coûteuses, ne sont que peu utilisées dans le bâti-

---

* Alevrite (en latin « aleurites »)

ment. On n'emploie les huiles naturelles que pour peindre les couvertures en tôle d'acier des bâtiments de première classe et la menuiserie métallique des bâtiments de première et deuxième classes, comme sous-couches des charpentes métalliques, pour peindre les menuiseries extérieures déjà enduites des édifices exigeant une finition de qualité supérieure.

On prépare les huiles siccatives semi-naturelles en traitant les huiles végétales par chauffage ou par soufflage d'air (oxydation). Dans certains cas, l'huile reçoit un traitement supplémentaire au soufre. Pour donner aux liants la fluidité requise, on les dilue avec des dissolvants organiques (45%, au plus).

Après séchage et durcissement, les pellicules obtenues avec des huiles siccatives semi-naturelles diffèrent de celles qu'on obtient avec des huiles naturelles par leur épaisseur moins grande, leur plus grande dureté et leur brillant plus intense. Ces pellicules résistent également très bien à l'eau. Par contre, elles perdent plus rapidement leur plasticité, et par suite durent moins longtemps que les pellicules des huiles siccatives naturelles.

On distingue quatre espèces d'huiles siccatives semi-naturelles :

c) *huile siccative polymérisée I.M.M.* (Institut des Matières premières minérales), qu'on obtient en épaississant par chauffage l'huile de lin ou l'huile de chènevis;

2) *huile dite « oksol »*, qu'on obtient en épaississant l'huile de lin ou de chènevis par soufflage d'air au chauffage;

3) *huile siccative oksol mélangée* qui diffère de la précédente par le fait qu'elle contient, en plus de l'huile de lin ou de chènevis, jusqu'à 30% d'huile de tournesol;

4) *huile oksol sulfurée*, qui diffère de l'huile siccative oksol par le fait que l'huile qu'elle contient est de plus traitée au soufre. D'une couleur sombre, cette huile est moins employée que les autres.

On peut utiliser les huiles siccatives semi-naturelles pour les ouvrages de première et de deuxième classe, toutes les fois qu'il est interdit d'employer les huiles siccatives naturelles (par exemple, pour les sous-couches, les masticages, la peinture des enduits).

Les huiles siccatives semi-naturelles ne conviennent pas pour préparer les couleurs à l'huile dures. Les couleurs que l'on obtient ainsi s'épaississent rapidement par suite

de l'évaporation du dissolvant organique que les huiles naturelles contiennent en grande proportion.

Actuellement, les huiles siccatives semi-naturelles sont les plus employées dans le bâtiment.

Les huiles siccatives artificielles diffèrent des huiles siccatives naturelles et semi-naturelles par le fait qu'elles contiennent moins de 35% d'huiles végétales, ou même n'en contiennent pas du tout.

Parmi les diverses huiles siccatives artificielles, il n'est permis actuellement d'employer que les suivantes dans le bâtiment :

carbonal, solution de sels d'aluminium et de calcium des acides hydroxy-carboxyliques dans une essence pour laque additionnée de térébenthine et de solventnaphta (les acides hydroxy-carboxylés sont des produits d'oxydation de la fraction semi-lourde, de densité 0,87 à 0,88, des pétroles bruts) ;

huile siccative au glyptal, solution de certaines résines artificielles, les glyptals, dans des dissolvants organiques contenant moins de 35% d'huiles végétales ;

huile siccative « syntol », solution de produits saponifiés d'oxydation du pétrole dans du benzol ou dans d'autres dissolvants organiques ;

huile siccative de schiste, préparée à partir des produits d'oxydation des huiles de schiste dissoutes dans des dissolvants organiques.

On emploie les huiles siccatives artificielles pour diluer les couleurs à l'huile jusqu'à la fluidité nécessaire. On les emploie également pour peindre les surfaces en acier, en bois, ainsi que les enduits d'éléments intérieurs de seconde importance. On ne doit pas les employer pour peindre les toitures, les charpentes métalliques extérieures, les sols et les objets ménagers tels que chaises, tables, etc.

Vernis à l'huile

Les vernis à l'huile sont des dissolutions de résines naturelles ou artificielles dans des huiles végétales contenant des siccatifs et des dissolvants. Les résines confèrent aux pellicules du vernis leur brillant et leur dureté, les siccatifs accélèrent leur séchage, les diluants leur donnent la fluidité nécessaire, les rendent plastiques et accroissent leur adhérence.

On emploie les vernis à l'huile comme liants dans les couleurs émail, en vue de donner du brillant au bois des sols en planches, aux panneaux, aux portes, etc. Selon la résine employée pour fabriquer les vernis à l'huile, on distingue les vernis au glyptal, au PVC, etc.

Pour évaluer la qualité d'un vernis à l'huile, il faut tenir compte des facteurs suivants : couleur, viscosité, transparence, quantité d'impuretés ou additifs mécaniques, rapidité de séchage, dureté et plasticité de la pellicule après séchage.

On emploie les vernis en conditions très variées, et leur nomenclature est elle-même très étendue.

On appelle vernis gras les vernis à l'huile contenant une forte proportion d'huile, et vernis maigres ceux qui ne contiennent qu'une faible proportion d'huile. Les vernis gras résistant mieux aux agents atmosphériques sont donc essentiellement employés pour les peintures extérieures.

Colles

On emploie diverses colles pour obtenir les liants à l'eau. On utilise plus souvent les colles de peau (peinture), les colles d'os (charpentage), la caséine acide et la dextrine.

On fabrique les *colles de peau* en traitant à l'eau bouillante les peaux d'animaux abattus, et en déshydratant ensuite le mélange obtenu. On produit les colles de peau sous forme de plaques, de granules et de lamelles.

Les *colles d'os* proviennent du traitement de la matière collante extraite des os dégraissés. Les propriétés techniques de ces colles sont voisines de celles des colles pour peinture.

Les colles pour peinture et charpentage doivent remplir certaines conditions quant à leur aspect extérieur. Elles ne doivent pas contenir d'impuretés ni avoir une mauvaise odeur. Leur réaction doit être neutre, et leur humidité ne doit pas dépasser 17%. Les solutions aqueuses doivent avoir une viscosité déterminée et ne pas pourrir pendant au moins 3 jours.

On obtient la *caséine acide* en faisant agir des acides minéraux et organiques sur le lait écrémé, et en déshydratant ensuite. On distingue la caséine broyée et la caséine non broyée.

On emploie la caséine comme liant dans les sous-couches à la colle, les masticages et certaines compositions colorées dont les pigments résistent aux bases.

On obtient la dextrine en traitant l'amidon par un acide ou à une chaleur de 150 à 200 °C. On distingue les dextrines blanche et jaune. La dextrine blanche est facilement soluble dans l'eau froide et reste liquide à basse température en solution concentrée. La dextrine jaune se dissout complètement dans l'eau chaude et forme après refroidissement une masse gélatineuse.

On emploie la dextrine dans les compositions colorées à la colle, pour les sous-couches à la colle, les masticages et pour coller les papiers peints.

Dissolvants

Les dissolvants sont destinés à diluer les vernis, les couleurs broyées et les sous-couches. Les dissolvants doivent s'évaporer de la couche de vernis au cours du séchage, ne pas réagir chimiquement ni avec les matières colorantes et vernis ni avec la surface peinte.

Les dissolvants les plus employés sont la térébenthine, le pétrole pour vernis et le solventnaphta.

On obtient la térébenthine par distillation du bois et de la résine naturelle des conifères. C'est un liquide incolore ou jaunâtre transparent et ayant une odeur pénétrante très caractéristique. On distingue la térébenthine du bois et la térébenthine de la résine, cette dernière étant très pure. La térébenthine est le plus onéreux des dissolvants. On l'emploie pour diluer les couleurs émail.

Le pétrole pour vernis est une fraction des pétroles bruts qui est comprise entre l'essence lourde et le pétrole pour tracteurs. Sa masse spécifique est 0,970 et sa température initiale d'ébullition ne dépasse pas 165 °C. On l'emploie pour diluer les couleurs à l'huile, les vernis et les couleurs émail à l'huile.

Le solventnaphta est un mélange de carbures d'hydrogène de la série aromatique (masse spécifique entre 0,874 et 0,910). Sa température d'ébullition est d'environ 140 °C. On l'emploie souvent mélangé à de l'essence pour vernis.

c) Composition des couleurs

Couleurs à l'huile

Les couleurs à l'huile sont des pâtes épaisses constituées par un mélange de pigments, d'une charge et d'un liant. Ces mélanges sont traités dans des broyeuses de couleurs (fig. 154). Les couleurs à l'huile sont fabriquées sous deux

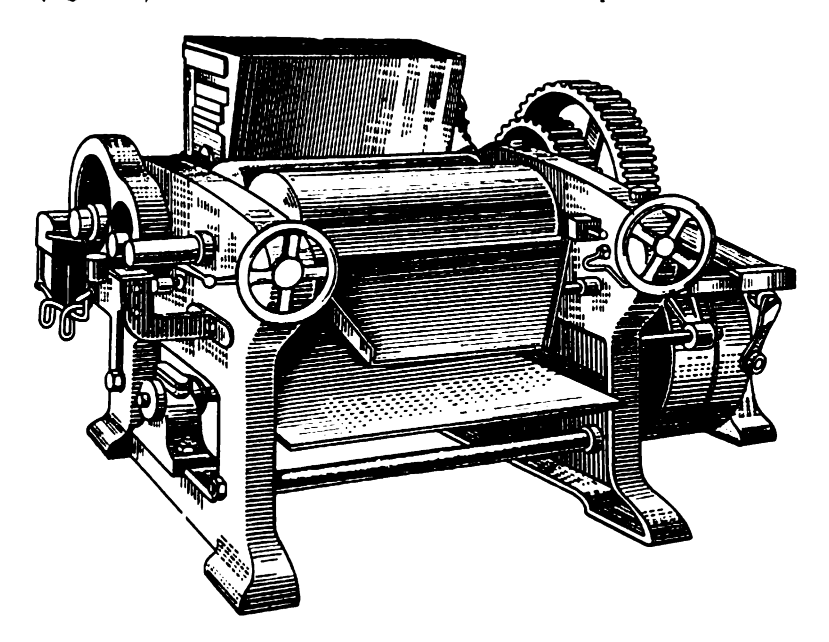


Fig. 154. Broyeuse de couleurs

formes : couleurs broyées épaisses et couleurs prêtes à être utilisées.

Les couleurs broyées épaisses doivent être diluées dans des huiles siccatives naturelles ou semi-naturelles, avant d'être utilisées. Les peintures prêtes à l'emploi sont utilisées sans être diluées.

On utilise les couleurs à l'huile pour tous travaux de peinture sur métal, bois et enduits.

On apprécie la qualité d'une couleur à l'huile par la proportion et la qualité des pigments et des huiles siccatives.

Pour différentes couleurs, les pigments et les charges doivent être broyés jusqu'à une grosseur maximale de 10 à 40 microns. Les peintures à l'huile doivent sécher en 24 heures à une température de 18 à 20 °C.

On conserve les couleurs à l'huile dans des boîtes en acier fermées par des couvercles hermétiques ou bien dans des tonneaux de bois.

Couleurs émail

A la différence des couleurs à l'huile, qui sont fabriquées avec de l'huile ordinaire ou un siccatif, les couleurs émail sont fabriquées avec des vernis spéciaux. Selon la résine polymère employée, on distingue les vernis au glyptal, les vernis pentophtaliques et les vernis au chlorure de vinyle surchloré. Après séchage, les couleurs émail ont une surface brillante, rappelant l'émail. Dans certains cas, une couleur émail remplace une couleur à l'huile vernie ensuite avec un vernis à l'huile. Les pellicules formées par les couleurs émail ayant une grande dureté, on emploie ces dernières pour peindre l'équipement sanitaire et les éléments en bois soumis à l'abrasion.

Les couleurs émail sont vendues prêtes à être employées et ne doivent pas être diluées.

Couleurs à l'eau et à la chaux

Dans ces couleurs, les pigments sont l'ocre, le bleu, le vert ou d'autres colorants minéraux, le liant étant la chaux en suspension dans l'eau. On emploie ces couleurs pour peindre les surfaces de briques, les surfaces extérieures enduites et bétonnées, pour la finition intérieure des édifices publics, pour peindre provisoirement les surfaces enduites encore incomplètement séchées, pour peindre les façades en bois, les pavillons provisoires, les baraques, les dépôts, etc.

On fabrique les couleurs à la chaux sur place, avec une chaux aérienne ou hydraulique. On emploie ces dernières quand la peinture à obtenir doit être mécaniquement résistante et bien résister à l'eau, par exemple, pour les établissements de bains, les buanderies, salles de douches, etc. On peut également employer un badigeon de chaux.

Composition approximative d'une couleur à la chaux : chaux 3 kg, sel de cuisine 0,1 kg, pigment résistant aux bases 0,3 kg au plus, et jusqu'à 10 litres d'eau. On dilue la chaux coulée en pâte dans une faible quantité d'eau. Le sel de cuisine est dissous séparément, puis ajouté à la pâte de chaux. On ajoute à ce mélange le pigment et le complément d'eau, tout en brassant. Avant d'utiliser le mélange, on le filtre à travers un tamis à mailles fines. Pour une sous-couche appropriée on prépare la composition suivante : chaux vive 2 kg, savon ordinaire 0,2 kg, huile siccative naturelle 0,03 kg.

Couleurs à l'eau et à la colle

Le liant utilisé pour les couleurs à l'eau et à la colle est une solution de colle (généralement, colle pour peinture) dans l'eau.

Les couleurs à la colle de caséine sont vendues en poudre sèche et il suffit de les diluer dans l'eau avant de les employer. On applique les couleurs à la caséine sur un fond de chaux, ou bien sur une sous-couche formée d'une couleur à la caséine diluée dans une grande quantité d'eau. Ne jamais peindre avec une couleur à la caséine sur une sous-couche de sulfate de cuivre.

On prépare les couleurs à la colle de la façon suivante. On dilue 1 kg de couleur sèche à la caséine dans un litre d'eau froide. Pour éviter la formation de grumeaux, on verse l'eau doucement, et l'on brasse constamment. Si des grumeaux se sont formés, on filtre la composition obtenue à travers un tamis de 100 mailles par cm^2. La couleur ainsi mélangée à l'eau doit être maintenue au repos pendant une heure. Ensuite, on la filtre à travers un tamis de 1 600 mailles par cm^2. Cette couleur peut être utilisée pendant les deux jours qui suivent.

On utilise les couleurs à la colle pour peindre les surfaces enduites des pièces d'habitation et des édifices publics. On les applique sur une sous-couche. Les sous-couches appropriées ont les compositions suivantes : sulfate de cuivre, sulfate de zinc, sulfate d'aluminium et sulfate de calcium.

On emploie les couleurs à la caséine pour peindre les surfaces extérieures des bâtiments en briques revêtus d'un enduit et en béton ainsi que pour la finition intérieure.

Emulsions de couleurs

Les émulsions de couleurs sont des suspensions de pigments que l'on prépare en broyant des pigments dans des émulsions aqueuses de divers générateurs de pellicules. Ces émulsions ont l'avantage de réduire la consommation en dissolvants organiques qui peuvent être remplacés complètement ou en partie par de l'eau.

Les émulsions de couleurs les plus employées sont les émulsions d'huile dans de l'eau. On peut diluer ces couleurs dans de l'eau et s'en servir pour peindre les surfaces humides.

Les peintures réalisées avec des émulsions de couleurs ne sont pas dangereuses au point de vue incendie au cours de l'exécution des travaux.

Les substances émulsionnantes employées pour préparer les émulsions de couleurs sont les savons au potassium, au sodium et à l'ammonium.

Outre les émulsions huileuses, on emploie également des couleurs dont le liant est un acétate de polyvinyle, du PVC, des polyacrylates, du nitrocellulose ou d'autres résines polymères (voir chapitre XII).

Vernis à l'alcool, vernis de polissage, nitrolaques

Les vernis à l'alcool sont des résines solides, généralement des résines synthétiques, qui sont dissoutes dans l'alcool ou dans un mélange d'alcool et d'autres dissolvants volatils.

A la différence des vernis à l'alcool, les vernis de polissage contiennent beaucoup moins de résine dissoute, si bien qu'il ne reste qu'une couche de résine extrêmement mince sur la surface traitée.

On emploie les vernis à l'alcool pour couvrir les objets en bois à l'intérieur des locaux et les vernis de polissage pour obtenir une surface ayant un bon brillant.

Les nitrolaques sont composées de nitrocellulose dissoute dans un dissolvant organique, et additionnée d'un plastifiant. Ces laques durcissent très rapidement et laissent une surface brillante. Il faut être prudent quand on travaille avec des nitrolaques, car elles sont toxiques et présentent un danger d'incendie. On ne les emploie que pour des travaux intérieurs.

On produit une catégorie spéciale de laques à la cellulose. Ces laques constituent un vernis au nitrate de cellulose,

et leur nom russe signifie littéralement « laques saponifiées » (tsaponlaque). On les emploie sur les métaux. Exemple de composition approximative : 7% de nitrocellulose, 30% d'acétate de butyl, 1% de dibutylphtalate (plastifiant), 35% d'acétate d'éthyle, 7% de butanol et 20% de toluène.

On emploie ces dernières laques quand on veut appliquer une pellicule très mince sur une surface de métal sans la masquer.

Couleurs au silicate et au ciment

Des couleurs dites au silicate et au ciment ont été dernièrement mises au point en Union Soviétique. La substance génératrice de pellicules de ces couleurs est du verre liquide (verre au potassium) ou bien du ciment Portland blanc. On peut fabriquer ces couleurs avec une matière première relativement abondante, et elles ne contiennent pas de dissolvants nuisibles à la santé.

Les couleurs au silicate sont des suspensions de pigments et de charges dans une solution de verre au potassium (voir chap. XIV, § 3).

§ 2. MATÉRIAUX COLLÉS

Parmi les matériaux collés que l'on emploie dans les travaux du second-œuvre, il faut citer les papiers peints, le lincrusta, le linoléum. Le lincrusta et le linoléum ont été décrits dans le chapitre XII.

Le papier peint est un papier vendu en rouleaux, qui est décoré de dessins divers ou bien monochrome et qui est destiné à être collé sur les murs des locaux. On emploie le papier peint pour embellir les logements, mais aussi dans des buts hygiéniques, car il bouche les gros pores de la maçonnerie. Le papier peint a une influence sur la clarté d'un local. Les murs absorbent d'autant moins de lumière c'est-à-dire réfléchissent d'autant mieux la lumière, que le papier est plus clair.

Pour fabriquer le papier peint, on emploie un papier spécial pesant de 70 à 200 g/m². Les couleurs employées sur ces papiers doivent résister à la lumière et être inoffensives. On emploie des colorants à l'aniline, rendus insolubles et mélangés avec de la craie et de la colle. On emploie égale-

ment des pigments minéraux (ocre, minium), ainsi que des poudres d'aluminium et de bronze.

On fabrique diverses variétés de papiers peints : papier avec ou sans sous-couche, papier imprimé, verni, métallisé, et papier à finition spéciale.

Les papiers peints sans sous-couche portent des dessins d'une seule ou plusieurs couleurs, qui sont appliquées directement sur le papier. On fabrique ces papiers avec de petits ou grands dessins, avec des motifs qui imitent les tapis et les gobelins, sous forme également de bordures ou de corniches pour recouvrir le haut des murs.

On fabrique le papier peint à sous-couche en recouvrant toute l'étendue du papier d'une sous-couche avant d'appliquer les dessins. Les papiers peints à sous-couche comportent diverses variétés : avec sous-couche monochrome et dessins monochromes ou polychromes ; avec dessins imitant les tapis ; avec sous-couche polychrome et dessins polychromes. Pour appliquer les dessins, on emploie des poudres métalliques de bronze ou d'aluminium.

On fabrique les papiers peints imprimés avec des papiers peints à sous-couche de grande épaisseur. On porte les dessins sur un papier mince avec des couleurs à l'huile, tout en imprimant. Les papiers peints imprimés durent beaucoup plus longtemps que les papiers peints sans sous-couche.

On fabrique les papiers peints vernis en portant sur un papier peint à sous-couche un dessin avec des couleurs à l'huile, suivi d'un vernissage au vernis à pellicule ou à la caséine. Les papiers peints vernis peuvent être avec ou sans impression. Ils durent plus longtemps que les papiers sans sous-couche. Tout comme les papiers imprimés du genre précédent, ils ne sont pas hygroscopiques et sont lavables.

On obtient les papiers peints métallisés en partant d'un papier peint ordinaire, sur lequel on porte une sous-couche contenant une poudre métallique, après quoi on procède à l'impression ou bien on imprime les dessins.

Les papiers peints à finition spéciale reçoivent d'abord une sous-couche et un dessin soit coloré soit métallisé, puis une finition spéciale supplémentaire. Les papiers peints gaufrés, moirés, satinés ou imitation velours sont ceux entrant dans cette catégorie. Les papiers peints

sont vendus en rouleaux de 50, 60 et 75 cm de largeur avec une tolérance de ±3 mm.

Les longueurs des rouleaux sont les suivantes : 6-12 m pour les papiers avec et sans sous-couche ; 7 m pour les papiers imprimés et vernis de 75 cm de large, et 6 m pour les bordures et les corniches. La tolérance sur la longueur des papiers peints est de ±25 cm.

On colle les papiers peints au mur après avoir recouvert leur face arrière d'une couche de colle à la farine, à l'amidon ou bien à la caséine avec une large brosse plate.

§ 3. VERRE

a) Verre à vitres

Le verre est un corps amorphe et transparent, produit de la fusion suivie de refroidissement d'un sable siliceux mêlé de sulfate et autres substances. L'augmentation progressive de la viscosité donne à la matière les propriétés des corps solides.

Les *verres de silicate*, auxquels se rapportent en particulier les verres employés dans le bâtiment contiennent de la silice (qui est l'oxyde principal), ainsi que des oxydes de sodium, de calcium et de magnésium. Dans la fabrication des verres colorés décoratifs, on emploie comme matières colorantes des oxydes de cuivre, de chrome, de fer, de cobalt et de quelques autres métaux.

Les matières premières employées dans la fabrication du verre à vitres sont le sable siliceux pur, la soude calcinée, les sulfates, la potasse et la chaux.

La cuisson des verres au silicate employés dans le bâtiment se fait dans des fours spéciaux à une température pouvant atteindre 1 500 °C.

Les caractéristiques physico-mécaniques du verre employé dans le bâtiment sont les suivantes : dureté 5 à 7 dans l'échelle des duretés, résistance minimale à la flexion 450 kg/cm^2, résistance à la compression pouvant atteindre 10 000 kg/cm^2, masse volumique 2 450 à 2 550 kg/m^3.

Le verre conduit relativement mal la chaleur. Sa conductivité varie entre 0,6 et 1,15 kcal/m·h·°C, en fonction de la catégorie considérée.

Le verre résiste mal à la chaleur parce qu'il possède d'une part un faible coefficient de conductivité et d'autre part un coefficient de dilatation thermique relativement élevé. Il est très stable chimiquement. A l'exception de l'acide fluorhydrique, les autres acides n'ont qu'une faible action. Les solutions basiques, et même l'eau pure, et en particulier l'eau tiède, le détériorent superficiellement, mais très lentement. L'eau entraîne une partie des bases contenues dans le verre. La silice libérée se sépare superficiellement sous la forme d'écailles et le verre devient trouble. La chaleur accélère ce phénomène, en particulier quand on lave le verre avec de l'eau chaude.

En U.R.S.S., on fabrique actuellement le verre à vitres dans des machines à étirage vertical. Ces machines étirent une bande de verre continue à travers la fente de la débiteuse plongée dans le verre en fusion. On sectionne des feuilles de dimensions requises à mesure que la bande moulée et refroidie sort de la machine.

Une nouvelle méthode d'étirage du verre sans débiteuse a été dernièrement mise au point. Cette méthode permet d'obtenir un verre de meilleure qualité, sans bandes — défaut essentiel des vitres fabriquées selon la méthode précédente.

Les bandes qui apparaissent sur la surface du verre étiré résultent d'une insuffisance d'homogénéité chimique et thermique de la masse vitrifiable. Dans le procédé sans débiteuse, le verre n'est pas étiré à travers une fente, mais directement de la surface libre de la masse de verre.

On fabrique le verre à vitres sous forme de feuilles de 2 à 6 mm d'épaisseur et de 250 × 250 mm jusqu'à 1 600 × × 2 200 mm.

A la réception des vitres feuilletées, il faut tenir compte des indices suivants : douceur et régularité des arêtes, absence d'angles fracturés, d'ébréchures et stries ne dépassant pas la norme. Le verre doit se fendre exactement sur la ligne tracée au moyen d'un diamant. Les principaux défauts du verre à vitres sont les suivants : bulles d'air, bandes minces filiformes, inclusions d'impuretés non transparentes.

Outre le verre à vitres ordinaire dit verre blanc, on utilise également des *verres colorés décoratifs*, soit transparents soit non.

On transporte le verre à vitres en position verticale, dans des caisses en bois, remplies de copeaux de bois.

b) Briques de verre

On appelle briques de verre des pièces creuses et transparentes, dont les faces intérieures ou extérieures peuvent être diversement façonnées. Ces briques sont constituées par deux éléments soudés, soumis ensuite à un traitement thermique.

Les briques de verre sont destinées au remplissage des baies des murs extérieurs, des cages d'escaliers, des toilettes, à l'aménagement des lanterneaux et des cloisons intérieures.

On classe les briques de verre :

a) d'après leur aspect, en briques carrées et angulaires ;

b) d'après la cavité intérieure, en briques à une et deux cavités.

Les briques carrées à une cavité sont les plus courantes (fig. 155).

L'Union Soviétique fabrique en grande série des briques de verre carrées et creuses de 194 × 194 × 98 mm.

Au cours de la compression des briques, on peut leur donner des bords lisses ou striés. Pour améliorer l'adhérence du verre au mortier de ciment, on recommande d'appliquer sur les bords des briques certains mastics spéciaux, saupoudrés d'un sable à gros grains, de granules de marbre, etc.

En tant que matériaux de construction, les briques de verre ont tous les avantages et les inconvénients du verre.

Dans les baies, les briques travaillent à la compression, au choc et à la flexion. La résistance à la compression et à la traction dépend beaucoup de la forme et de la construction des blocs, mais aussi de la composition chimique de la masse de verre et de la qualité de la cuisson.

La résistance à la compression d'une brique de verre peut atteindre 200 kg/cm². Une bonne cuisson, qui a pour effet de réduire les contraintes internes, améliore beaucoup la résistance mécanique des briques de verre.

Grâce à leur cavité intérieure remplie d'air, les briques de verre ont un coefficient de conductivité très faible égal à 0,36 alors qu'il se chiffre à 0,70 kcal/m·h·°C pour les briques ordinaires. Les briques de verre sont mises en place avec un mortier de ciment et une armature en acier.

Les briques de verre ne doivent pas être employées comme éléments porteurs, vu la grande différence entre les coefficients de dilatation des matériaux, la grande fragilité du verre et sa faible résistance aux vibrations et aux charges

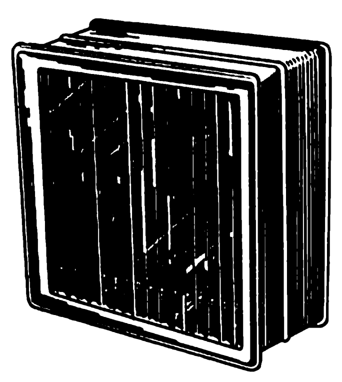


Fig. 155. Brique de verre

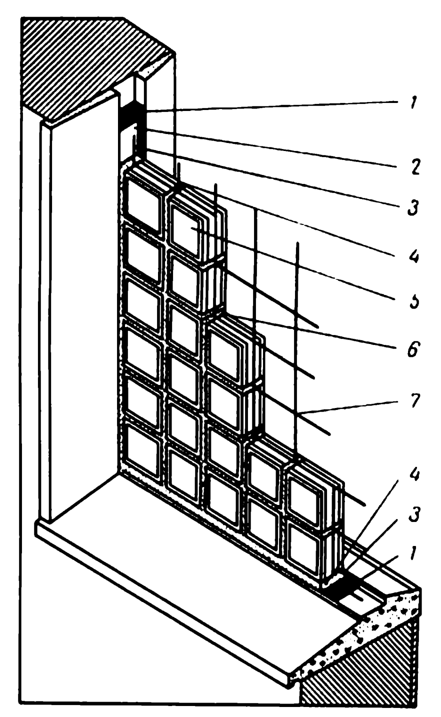


Fig. 156. Vue d'ensemble d'une baie avec remplissage en briques de verre:

1 — mastic bitumineux ; *2* — joint élastique; *3* — joint d'étanchéité des jeux latéraux ; *4* — encadrement ; *5* — brique de verre ; *6* — joints en ciment; *7* — armature

de flexion. La condition essentielle et générale que l'on doit remplir en mettant les briques de verre en place est donc d'isoler les panneaux en verre et béton des éléments porteurs en briques et béton armé.

Un panneau en verre et béton armé est un ensemble monolithe constitué par des briques de verre reliées entre elles par des joints armaturés en mortier de ciment.

On armature les joints entre les briques de verre avec des fils d'acier dont on calcule le diamètre d'après la pression exercée par le vent sur la surface. Le diamètre des fils varie de 4 à 10 mm. On peut voir sur la fig. 156 le schéma d'une armature.

§ 4. PLAQUES EN PIERRE FONDUE

On emploi dans le bâtiment des plaques de revêtements obtenues en faisant fondre certaines roches et en versant ensuite la masse fondue dans des moules. Ces plaques en pierre artificielle ont les avantages suivants : régularité des formes, résistance mécanique élevée, forte compacité, résistance à la chaleur, résistance au gel, résistance aux agents chimiques, longévité.

La fabrication des pierres artificielles comprend les opérations suivantes : fusion, moulage, recristallisation et refroidissement.

On utilise les déchets résultant de l'équarrissage des basaltes et des diabases, c'est-à-dire des roches ayant une forte teneur en oxydes des métaux alcalino-terreux. Ces roches, laissées au repos après le moulage (deux à trois heures à 700-900 °C), ont la faculté d'acquérir une texture finement cristalline et d'atteindre une résistance à la compression de 2 000 à 5 000 kg/cm^2, et une résistance à la flexion de 400 kg/cm^2. La dureté des pièces coulées en pierre est d'environ 6 à l'échelle de Moos. Dans la majeure partie des cas, on obtient des plaques foncées à la coulée. Pour obtenir une pierre coulée claire, on fait fondre un sable quartzeux pur et de la dolomite avec addition de spath fusible. Les plaques moulées sont ensuite cuites.

On emploie les plaques en pierre coulée pour les revêtements extérieurs et intérieurs des bâtiments qui doivent durer longtemps et qu'on désire protéger contre l'action des agents chimiques. Ces plaques sont fixées à la surface au moyen d'un mortier de ciment.

TABLE DES MATIÈRES

A NOS LECTEURS

Les Editions Mir vous seraient très reconnaissantes de bien vouloir leur communiquer votre opinion sur le contenu de ce livre, sa traduction et sa présentation, ainsi que toute suggestion que vous voudriez formuler.

Ecrire à l'adresse :
Ier Rijski péréoulok, 2,
Moscou, I—278,
U.R.S.S.

Imprimé en Union Soviétique